



TUGAS AKHIR - MO 141326

ANALISA RESPON GERAK STRUKTUR *FLOATING WIND TURBINE*
TIPE SPAR DENGAN VARIASI SISTEM TAMBAT

ALMUTAHIR

NRP. 4312100081

Dosen Pembimbing

Yoyok Setyo Hadiwidodo, ST, MT, Ph.D

Dirta Marina C. ST. MT

JURUSAN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016



TUGAS AKHIR - MO 141326

MOTION RESPONSE ANALYSIS OF SPAR TYPE FLOATING WIND TURBINE STRUCTURE WITH VARIATION OF MOORING SYSTEM

ALMUTAHIR

NRP. 4312100081

Supervisor

Yoyok Setyo Hadiwidodo, ST,MT, Ph.D

Dirta Marina C. ST. MT

DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING

Faculty of Marine Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016

**ANALISA RESPON GERAK STRUKTUR FLOATING WIND TURBINE
TIPE SPAR DENGAN VARIASI SISTEM TAMBAT**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada Progran Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

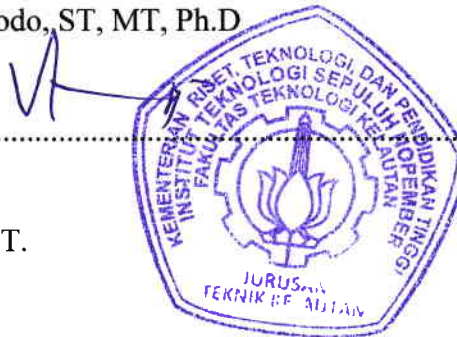
ALMUTAHIR

NRP. 4312100081

Disetujui oleh :

1. Yoyok Setyo Hadiwidodo, ST, MT, Ph.D

(Pembimbing I)



2. Darta Marina C. ST. MT.

(Pembimbing II)

3. Prof. Ir Daniel M. Rosyid, Ph. D

(Penguji)

4. Dr. Ir. Hasan Ikhwani, M.Sc.

(Penguji)

SURABAYA, JULI 2016

ANALISA RESPON GERAK STRUKTUR *FLOATING WIND TURBINE* TIPE *SPAR* DENGAN VARIASI SISTEM TAMBAT

Nama : Almutahir
NRP : 4312100081
Jurusan : Teknik Kelautan FTK - ITS
Dosen Pembimbing : Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T. , M.T. , Ph.D.
Dirta Marina C. S.T. , M.T.

ABSTRAK

Potensi sumber angin sebagian besar di daerah perairan dalam sehingga munculnya konsep untuk pengembangan teknologi turbin angin untuk wilayah lepas pantai. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisa respon gerak pada *Floating Wind Turbine* tipe *Spar* dengan beberapa simulasi. Simulasi yang dilakukan pada Tugas Akhir ini adalah variasi sistem tambat, dan variasi tinggi sarat air. Struktur *Floating Wind Turbine* akan ditinjau dalam 6 derajat kebebasan. Proses analisa respon gerak FWT menggunakan bantuan *software* dengan metode *frequency domain*. Dari hasil tersebut diharapkan diperoleh konfigurasi struktur dengan sistem penambatan yang efektif mereduksi amplitudo gerak dan respon spektra struktur.

Pengaruh Sistem Tambat *Taut* sangat signifikan mereduksi gerakan struktur pada semua mode gerakan yang ditinjau. Sistem Tambat *Taut* mampu mereduksi gerakan struktur rata-rata 73.86% sedangkan Sistem Tambat *Catenary* mampu mereduksi gerakan struktur rata-rata sebesar 22.30 %.

Amplitudo gerakan struktur untuk semua mode gerakan yang ditinjau akan tereduksi seiring dengan penambahan tinggi sarat air. Konfigurasi model struktur *Floating Wind Turbine* Sarat 130 meter dengan Sistem Tambat *Taut* mengurangi amplitudo gerakan dan respon spektra struktur lebih baik dibandingkan konfigurasi lainnya pada semua mode gerakan yang ditinjau.

Kata Kunci : Analisa Respon Gerak, *Floating Wind Turbine* tipe *Spar*, *Mooring System*, Sarat Air, dan *Frequency Domain*.

MOTION RESPONSE ANALYSIS OF SPAR TYPE FLOATING WIND TURBINE STRUCTURE WITH VARIATION OF MOORING SYSTEM

Name : ***Almutahir***
NRP : ***4312100081***
Departement : ***Ocean Engineering, FTK - ITS***
Supervisor : ***Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T. , M.T. , Ph.D.***
Dirta Marina C. S.T. , M.T.

ABSTRACT

Potential sources of wind mostly in deep sea so that the emergence of the concept to development of floating wind turbine technology for the offshore area. So that is need, analyzed motion response on Floating Wind Turbine type of Spar with some simulations. Simulations are conducted in this research are a variation of the mooring system, and draft. Besides, the direction of loading also vary at each simulation. Floating Wind Turbine structure will be reviewed in six degrees of freedom. Motion response analysis using statistical software with frequency domain methods. These results expected to be obtained by the structural configuration that effectively reduce the amplitude of structural motion and structural response.

Taut Mooring System significantly reduce structural motion on all modes of motion being reviewed. Taut Mooring Systems is able to reduce amplitude of motion structure of an average 73,86%. While the Catenary Mooring System is able to reduce motion structure of an average of 22,30%.

The amplitude of structural motion for all modes will be reduced with the addition of draft. Configuration structure model Floating Wind Turbine Draft 130 M with Taut Mooring System reduces the amplitude of structural motion and structural response is better than the other configurations.

Keywords : Motion Response Analysis, Floating Wind Turbine type Spar, Mooring System, Draft and Frequency Domain.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
<i>ABSTRACT</i>	v
KATA PENGANTAR	vi
UCAPAN TERIMA KASIH.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat.....	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.2 Dasar Teori	6
2.2.1 Dasar Analisa Dinamis	6
2.2.2 Struktur Turbin Angin Lepas Pantai.....	7
2.2.3 <i>Mooring System</i>	7
2.2.3.1 <i>Catenary Mooring</i>	7
2.2.3.2 <i>Taut Mooring</i>	8
2.2.3.3 <i>Tention Leg Mooring</i>	9
2.2.4 Persamaan Gerak Pada <i>Floating Wind Turbine</i>	9
2.2.5 Konsep Pembebanan	13
2.2.6 Beban Gelombang	14
2.2.7 Spektrum Gelombang.....	15
2.2.8 Frekuensi dan Periode Natural	17
2.2.9 <i>Response Amplitudo Operator</i>	18
2.2.10 <i>Spectrum Response</i>	19
2.2.11 Beban Angin.....	20
2.2.11.1 Gaya Angin pada Tiang.....	20

2.2.11.2 Gaya Angin pada Turbin	20
2.2.12 Kriteria Stabilitas <i>Floating Wind Turbine</i>	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	23
3.2 Prosedur Penelitian	24
3.2.1 Studi Literatur.....	24
3.2.2 Pengumpulan data	24
3.2.3 Konfigurasi Simulasi	26
3.2.4 Pemodelan Struktur dan Validasi	28
3.2.5 Analisa Respon Gerak dan Validasi	29
3.2.6 Pemodelan struktur pada kondisi tertambat.....	29
3.2.7 Analisa Komparasi Respon Gerak Struktur.....	29
3.2.8 Kesimpulan.....	29
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	30
4.1 Simulasi Sistem Tambat	30
4.1.1 Pemodelan Struktur <i>Floating Wind Turbine</i>	30
4.1.2 Validasi Pemodelan Struktur <i>Floating Wind Turbine</i>	32
4.1.3 Analisa Respon Gerak Struktur Pada Gelombang Reguler	32
4.1.4 Analisa Respon Gerak Struktur dengan Variasi Sistem Tambat.....	36
4.1.5 Analisa Stabilitas Struktur	40
4.2 Simulasi Sarat Air dan Sistem Tambat.....	41
4.2.1 Pemodelan Struktur <i>Floating Wind Turbine</i>	41
4.2.2 Analisa Respon Gerak Struktur	41
4.2.2.1 Respon Gerak Struktur Pengaruh Sistem Tambat <i>Taut</i>	42
4.2.2.2 Respon Gerak Struktur Pengaruh Sistem Tambat <i>Catenary</i>	45
4.3 Respon Gerakan pada Gelombang Irreguler	48
4.3.1 Spektrum Gelombang	48
4.3.2 Analisa Respon Spektra.....	49
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	54
5.1 Kesimpulan	54
5.2 Saran	54
DAFTAR PUSTAKA	55
LAMPIRAN.....	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Jenis-jenis Struktur Floating Wind Turbin.....	2
Gambar 2. 1 FWT Tipe <i>Spar</i> dengan Sistem Tambat <i>Catenary</i>	8
Gambar 2. 2 FWT Tipe <i>Spar</i> dengan Sistem Tambat <i>Taut</i>	8
Gambar 2. 3 FWT Tipe <i>Spar</i> dengan Sistem Tambat <i>Tension Leg</i>	9
Gambar 2. 4 Gerkan FWT Tipe <i>Spar</i> dalam 6 derajat kebebasan.....	10
Gambar 2. 5 Grafik Karakteristik Operasional Turbin Angin	20
Gambar 2. 6 Kriteria stabilitas derajat kebebasan <i>pitch</i>	22
Gambar 3. 1 Diagram Alir Tugas Akhir	23
Gambar 3. 2 Struktur <i>Floating Wind Turbine</i> tipe <i>Spar</i>	25
Gambar 3. 3 Arah Pembebanan <i>Floating Wind Turbine</i>	28
Gambar 4. 1 Model Geometri Struktur <i>Floating Wind Turbine</i> kondisi <i>Free Floating</i>	30
Gambar 4. 2 Model <i>Geometri Floating Wind Turbine</i> dengan sistem tambat <i>catenary</i>	31
Gambar 4. 3 Model <i>Geometri Floating Wind Turbine</i> dengan sistem tambat <i>taut</i>	31
Gambar 4. 4 Grafik RAO Gerak <i>Surge</i> pada kondisi <i>Free Floating</i>	33
Gambar 4. 5 Grafik RAO Gerak <i>Sway</i> pada kondisi <i>Free Floating</i>	33
Gambar 4. 6 Grafik RAO Gerak <i>Heave</i> pada kondisi <i>Free Floating</i>	34
Gambar 4. 7 Grafik RAO Gerak <i>Roll</i> pada kondisi <i>Free Floating</i>	34
Gambar 4. 8 Grafik RAO Gerak <i>Pitch</i> pada kondisi <i>Free Floating</i>	35
Gambar 4. 9 Grafik RAO Gerak <i>Yaw</i> pada kondisi <i>Free Floating</i>	35
Gambar 4. 10 Grafik RAO Gerak <i>Surge</i> dengan <i>load case</i> 0°	37
Gambar 4. 11 Grafik RAO Gerak <i>Surge</i> dengan <i>load case</i> 45°	37
Gambar 4. 12 Grafik RAO Gerak <i>Heave</i> dengan <i>load case</i> 0°	38
Gambar 4. 13 Grafik RAO Gerak <i>Heave</i> dengan <i>load case</i> 45°	38
Gambar 4. 14 Grafik RAO Gerak <i>Pitch</i> dengan <i>load case</i> 0°	39
Gambar 4. 15 Grafik RAO Gerak <i>Pitch</i> dengan <i>load case</i> 45°	39
Gambar 4. 16 Grafik RAO Gerak <i>surge</i> dengan <i>load case</i> 0°	42

Gambar 4. 17 Grafik RAO Gerak <i>Surge</i> dengan <i>load case</i> 45°	42
Gambar 4. 18 Grafik RAO Gerak <i>heave</i> dengan <i>load case</i> 0°	43
Gambar 4. 19 Grafik RAO Gerak <i>Heave</i> dengan <i>load case</i> 45°	43
Gambar 4. 20 Grafik RAO Gerak <i>Pitch</i> dengan <i>load case</i> 0°	44
Gambar 4. 21 Grafik RAO Gerak <i>Pitch</i> dengan <i>load case</i> 45°	44
Gambar 4. 22 Grafik RAO Gerak <i>Surge</i> dengan <i>load case</i> 0°	45
Gambar 4. 23 Grafik RAO Gerak <i>Surge</i> dengan <i>load case</i> 45°	45
Gambar 4. 24 Grafik RAO Gerak <i>Heave</i> dengan <i>load case</i> 0°	46
Gambar 4. 25 Grafik RAO Gerak <i>Heave</i> dengan <i>load case</i> 45°	46
Gambar 4. 26 Grafik RAO Gerak <i>Pitch</i> dengan <i>load case</i> 0°	47
Gambar 4. 27 Grafik RAO Gerak <i>Pitch</i> dengan <i>load case</i> 45°	47
Gambar 4. 28 Grafik Spektra Jonswap	49
Gambar 4. 29 Grafik Respon Spektra Gerakan <i>Surge</i> dengan Sistem Tambat <i>Taut</i>	49
Gambar 4. 30 Grafik Respon Spektra Gerakan <i>Heave</i> dengan Sistem Tambat <i>Taut</i>	50
Gambar 4. 31 Grafik Respon Spektra Gerakan <i>Pitch</i> dengan Sistem Tambat <i>Taut</i>	50
Gambar 4. 32 Grafik Respon Spektra Gerakan <i>Surge</i> dengan Sistem Tambat <i>Catenary</i>	51
Gambar 4. 33 Grafik Respon Spektra Gerakan <i>Heave</i> dengan Sistem Tambat <i>Catenary</i>	51
Gambar 4. 34 Grafik Respon Spektra Gerakan <i>Pitch</i> dengan Sistem Tambat <i>Catenary</i>	52

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Amplitudo dan tinggi gelombang pada spektrum	15
Tabel 3. 1 Data Lingkungan Selat Makassar, (Dinaryo, 2016).....	24
Tabel 3. 2 Data <i>Turbine</i> , NREL (Solberg, 2011).....	24
Tabel 3. 3 Properti <i>Substructure</i> FWT (Solberg, 2011).....	25
Tabel 3. 4 Properti <i>Mooring Line</i>	26
Tabel 3. 5 Parameter Simulasi 1	26
Tabel 3. 6 Propertis Variasi Model FWT.....	27
Tabel 3. 7 Parameter Simulasi 2	27
Tabel 3. 8 Periode Natural <i>Deep Draught Floating</i> , DNV F205.....	29
Tabel 4. 1 Perbandingan Hasil Pemodelan Struktur FWT Sarat 120 M.....	32
Tabel 4. 2 Validasi Periode Natural Struktur	36
Tabel 4. 3 Nilai RAO Maksimum dengan arah pembebanan 0°	40
Tabel 4. 4 Nilai RAO Maksimum dengan arah pembebana 45°	40
Tabel 4. 5 Perbandingan Hasil Pemodelan Struktur FWT Sarat 130 M.....	41
Tabel 4. 6 Perbandingan Nilai RAO Maksimum pada Setiap Sarat	48
Tabel 4. 7 Nilai Maksimum <i>Response Spectra</i>	53

BAB I

PENDAHULUAN

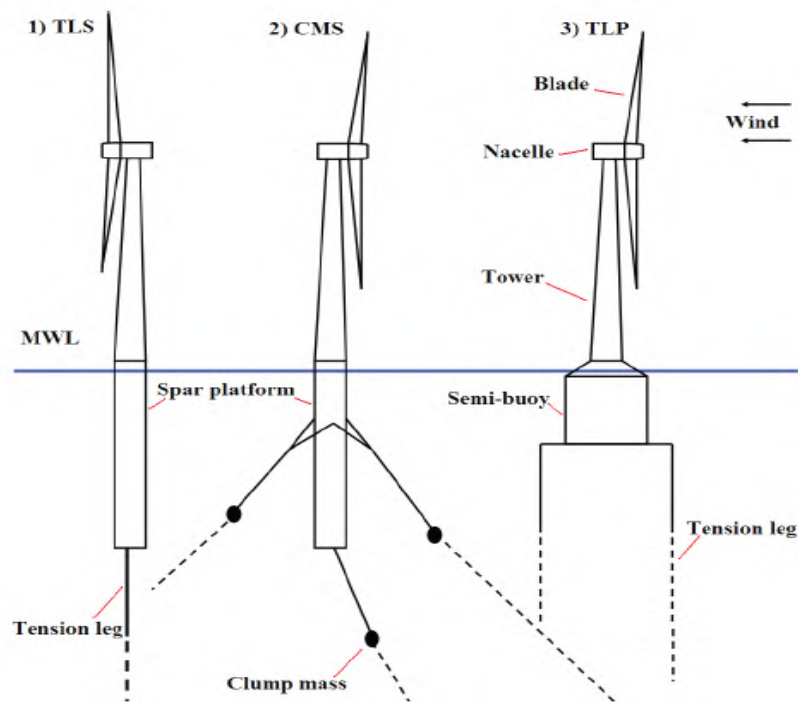
1.1 Latar Belakang

Sumber-sumber angin potensial yang signifikan, kebanyakan berada di daerah perairan cukup dalam sehingga menyebabkan munculnya berbagai konsep pengembangan ladang turbin angin terapung untuk area lepas pantai. Salah satu konsep penopangnya yaitu *spar-buoy* yang diadopsi dari konsep teknologi anjungan lepas pantai yang sudah lebih dulu diaplikasikan dalam bidang minyak dan gas lepas pantai (Rofi'uddin, 2009).

Aliran angin yang berhembus di atas permukaan laut lebih stabil dan lebih besar bila dibandingkan hembusan angin di darat. Sudah seharusnya pembangkit listrik tenaga angin di tempatkan di laut. *Floating Wind Turbine* merupakan salah satu terobosan teknologi terbaru yang lebih praktis dan ekonomis sebagai pembangkit tenaga angin lepas pantai, baik untuk laut dalam maupun laut menengah. Analisa respon dinamik diperlukan untuk menjaga integritas struktur (Karimirad, 2011).

Henderson (2002) dalam jurnal tugas akhir Rofiuddin (2009) merumuskan ada empat jenis struktur penopang *Floating Wind Turbine* yakni jenis *Semi-Submersible*, jenis *Tention Leg Platform*, jenis *Spar-Buoy*, dan jenis *Spaceframe Structure*.

Berdasarkan pengalaman pada bangunan anjungan minyak dan gas lepas pantai, *Floating Wind Turbine* memiliki struktur pondasi dan sistem pertambatan yang berbeda-beda. Konsep struktur *Floating Wind Turbin* yang tepat untuk laut dalam adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar 1. Konsep sistem pertambatan dengan *catenary* atau *taut* memanfaatkan *ballast system* yang berada dibawah struktur *spar* untuk menopang stabilitas struktur. *Tention Leg Platform* menerima stabilitas melalui penggunaan sistem tendon pada platform. Sedangkan konsep *Tention Leg Spar* adalah campuran dari kedua konsep tersebut, sehingga memanfaatkan keuntungan dari konsep keduanya (Karimirad, 2011).



Gambar 1. 1 Jenis-jenis Struktur Floating Wind Turbin
(Karimirad, 2011)

Menurut Lee (2005) sebuah struktur penopang tipe *spar* telah dipilih sebagai platform dasar. Hal ini dimodelkan sebagai struktur silinder simetris yang kaku dengan tali tambat *catenary* terpasang di bagian bawah silinder yang terhubung ke dasar laut dalam empat kuadran terpisah. Hal ini memberikan stabilitas dan kekakuan pada seluruh sistem.

1.2 Rumusan Masalah

Sehubungan dengan latar belakang di atas permasalahan yang akan dikaji dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana respon gerak struktur *Floating Wind Turbine* tipe *Spar* dengan variasi konfigurasi struktur ?
2. Bagaimana perbandingan perilaku gerakan struktur *Floating Wind Turbine* untuk setiap variasi konfigurasi struktur ?

1.3 Batasan Masalah

Batasan-batasan masalah yang ada dalam Tugas Akhir ini adalah :

- Data struktur *spar* yang digunakan, diambil dari jurnal Thomas Solberg, 2011. *Dynamic Response Analysis of a Spar Type Floating Wind Turbine*.
- Data Turbin angin menggunakan turbin angin NREL diambil dari jurnal Jonkman
- Beban lingkungan yang bekerja adalah beban gelombang, dan angin
- Analisa yang digunakan adalah metode *frequency Domain*
- Analisa gerakan meliputi enam arah gerak : *surge, sway, heave, pitch, roll*, dan *yaw*
- Pengaruh *Vortex Induced Vibration* diabaikan
- Arah pembebanan yang bekerja pada struktur adalah 0, 45°, dan 90 °
- Pemodelan struktur menggunakan *software Ansys*

1.4 Tujuan

Tujuan dari penulisan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisa respon gerak struktur *Floating Wind Turbine* tipe *spar-buoy* dengan variasi system tambat
2. Mengetahui konfigurasi struktur yang paling baik mereduksi gerakan struktur.

1.5 Manfaat

Dari Tugas Akhir ini, diharapkan dapat diambil manfaat sebagai berikut :

- a. Secara akademis, diharapkan hasil pengerjaan Tugas Akhir ini dapat membantu menunjang proses belajar mengajar dan turut memajukan *khazanah* pendidikan.
- b. Secara praktis, diharapkan hasil dari Tugas Akhir ini dapat berguna sebagai bahan pertimbangan kepada pihak-pihak yang tertarik untuk pengembangan teknologi energi terbarukan.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan Tugas Akhir ini dimulai dengan bab satu pendahuluan yang berisi latar belakang, perumusan masalah, tujuan yang ingin dicapai dalam penyusunan Tugas Akhir ini, manfaat yang diperoleh, dan ruang lingkup serta sistematika penulisan laporan.

Tinjauan pustaka dan landasan teori yang menjadi referensi serta standar yang digunakan sebagai acuan pengerjaan Tugas Akhir ini di jelaskan pada bagian ke dua bab ini.

Metodologi penelitian dalam pengerjaan Tugas Akhir ini diterangkan pada bab tiga. Data-data yang dibutuhkan serta Penjelasan pemodelan struktur juga dipaparkan pada bab ini.

Bab empat pada Tugas Akhir ini menjelaskan seluruh hasil analisa dan pembahasan penelitian pada Tugas Akhir ini. Pada bab ini akan dibahas data hasil dari *output* pemodelan hingga menghasilkan kesimpulan yang menjadi tujuan dari Tugas Akhir ini yang dipaparkan pada bab lima.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam tesisnya Karimirad (2011) melakukan analisa respon dinamis stokastik *wind turbine* tipe *spar* dengan sistem tambat *catenary* dan *taut*. Analisa gelombang dan angin stokastik menunjukkan bahwa, model *rigid body* sudah cukup memadai untuk akurasi gerakan, pertimbangan karakteristik elastik dari tower/struktur pendukung juga diperlukan untuk memprediksi respon struktur. Konfigurasi Struktur *Catenary Mooring* dan *Taut Mooring* didominasi oleh inersia struktur dan viskositas *drag* hidrodinamik tidak mempengaruhi respon akibat gelombang.

Survivability atau kemampuan bertahan dalam segala kondisi sangat penting dalam merancang sebuah struktur, termasuk *Floating Wind Turbine*. Dalam Kondisi ekstream, respon dinamis *coupled* didominasi oleh pengaruh beban angin. Perbandingan antara pengaruh angin stabil dan angin kondisi *turbulent* adalah angin kondisi stabil mempengaruhi frekuensi natural *pitch*. Sedangkan angin kondisi *turbulent* mempengaruhi frekuensi natural *pitch* dan *surge* (Karimirad dkk, 2009).

Rofiu'uddin (2009) melakukan analisa perilaku dinamis pada struktur *Floating Wind Turbine* dengan melakukan variasi pada diameter *hull* dan diameter *bilga*. Struktur yang dipilih adalah konfigurasi struktur yang mempengaruhi gerakan *heave* terkecil. Hasil pengujian variasi diameter *hull* dan variasi diameter *bilga* menunjukkan bahwa penambahan diameter *hull* dan diameter *bilga* pada struktur *Floating Wind Turbine* (FWT) secara umum memperkecil respon gerakan *heave*, dan memperbesar respon gerakan *surge*, *sway*, *roll*, dan *pitch*. Sedangkan pada gerakan rotasional *yaw* sangat kecil karena akibat dari bentuk struktur yang silinder dan simietris, sehingga resultan gaya pada struktur yang mengakibatkan gerakan *yaw* sama dengan atau mendekati nol.

Salah satu syarat agar bangunan apung dapat beroperasi dengan aman adalah bangunan tersebut harus berada pada posisinya. Alternatif untuk mengatasi hal ini adalah penggunaan *heave plate* dan sistem tambat ideal (Akhbar,2015).

Anastasia (2009) menganalisa gerakan *spar* sebagai struktur pendukung anjungan minyak lepas pantai secara numerik dengan menggunakan sistem tambat yang berbeda yakni sistem tambat taut dan sistem *catenary*.

Stabilitas struktur turbin angin terapung lepas pantai diperlukan agar turbin angin bisa bekerja dilaut lepas. Pembatasan pergerakan rotasi *pitch* bisa dijadikan kategori stabilitas struktur. Stabilitas struktur bisa ditentukan apabila respons struktur terhadap gaya eksitasi diketahui. Semakin meningkat *sea state* pengaruh gaya gelombang terhadap stabilitas rotasi *pitch* semakin besar sedangkan pengaruh gaya angin semakin kecil (Hendi, 2011).

Analisa perilaku dinamis *spar* ini didasarkan pada API RP 2T (1987) dengan menggunakan metode *frequency domain analysis* yakni simulasi kejadian pada waktu tertentu dengan interval frekuensi yang telah ditentukan sebelumnya.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Dasar Analisa Dinamis

Menurut API RP 2T, analisa dinamis struktur lepas pantai terdapat 2 metode analisa domain, yaitu *frequency domain analysis* dan *time domain analysis*. *Frequency domain analysis* adalah simulasi kejadian pada saat tertentu dengan interval frekuensi yang telah ditentukan sebelumnya. *Frequency domain* juga dapat memperkirakan respon gelombang acak termasuk gerakan platform, percepatan, gaya tendon dan sudut. Keuntungannya adalah lebih menghemat waktu perhitungan dan juga input atau output yang lebih sering digunakan oleh perancang. Namun kekurangannya adalah semua persamaan *non-linier* harus diubah dalam bentuk *linier*. Sedangkan *time domain analysis* adalah penyelesaian gerak dinamis struktur berdasarkan fungsi waktu. Pendekatan yang dilakukan dalam metode ini menggunakan prosedur integrasi waktu dan akan menghasilkan *response time histori* berdasarkan waktu $x(t)$.

Dalam Akhbar (2015) Yilmaz (2004) mengungkapkan keuntungan dari *time domain* adalah semua tipe *non-linier* (matrik sistem dan beban-beban eksternal) dapat dimodelkan dengan lebih tepat. Kekurangannya adalah memerlukan waktu perhitungan yang lebih banyak.

2.2.2 Struktur Turbin Angin Lepas Pantai

Komponen struktur turbin angin lepas pantai dapat dibagi menjadi 2 bagian yaitu struktur pendukung dan turbin, kemudian struktur pendukung dapat dibagi lagi menjadi 2 bagian yaitu tiang dan substruktur. Tiang dapat dibagi menjadi 2 tipe yang umum digunakan yaitu tipe *lattice* (rangka batang) dan silinder. Turbin angin lepas pantai dikategorikan turbin angin terapung lepas pantai jika bagian substrukturnya merupakan struktur terapung. Besarnya diameter *rotor* mempengaruhi besarnya kapasitas daya listrik yang dibangkitkan oleh turbin. Sebagai contoh: dengan menggunakan *rotor* yang berdiameter 112 m diharapkan menghasilkan daya listrik 4.5 MW (Hendi, 2011).

2.2.3 Mooring System

Akhbar (2015) menjelaskan sistem tambat merupakan salah satu komponen yang penting untuk menjaga salah satu komponen yang penting untuk menjaga struktur dalam keadaan stabil. Konfigurasi *mooring line* secara garis besar terdiri dari tiga konsep yakni sistem *catenary*, sistem *taut leg*, dan *vertical tension leg*. Ketiga konsep tersebut adalah sebagai berikut.

2.2.3.1 Catenary Mooring

Sistem *catenary* adalah sebuah struktur bentuk kurva yang biasanya berupa kabel atau rantai, menggantung bebas dengan kedua ujungnya tertahan. Keuntungan menggunakan system ini adalah dapat memanfaatkan berat *mooring line* sehingga struktur terapung tertahan diposisinya selama mendapat beban dari lingkungan. Adapun masalah yang sering dihadapi adalah gaya tarik vertikal tidak memadai untuk menjaga stabilitas struktur di atasnya untuk melawan *overtuning*. Berikut ini adalah gambar struktur Floating Wind Turbine tipe *spar* dengan sistem tambat *catenary*.



Gambar 2. 1 FWT Tipe *Spar* dengan Sistem Tambat *Catenary*
Karimirad, (2011)

2.2.3.2 *Taut Mooring*

Sistem *taut mooring* pada laut dalam akan lebih menguntungkan dibandingkan *catenary mooring*. Hal ini karena panjang *mooring line* yang digunakan lebih pendek sehingga penggunaannya lebih sedikit. Berikut ini adalah gambar sistem *taut leg mooring*.



Gambar 2. 2 FWT Tipe *Spar* dengan Sistem Tambat *Taut*
(<http://www.builtworlds.com/news/2016/1/22/worlds-first-floating-wind-farm-to-surface-off-scottish-coast>)

2.2.3.3 Tention Leg Mooring

Sistem *vertical tention leg* menyediakan stabilitas yang baik bagi struktur atasnya. Struktur atas dapat ditenggelamkan dibawah muka air untuk mengurangi efek beban gelombang yang bekerja pada struktur tersebut. Sistem ini membutuhkan sistem pondasi yang dapat menahan gaya vertikal besar. Namun kekurangan sistem ini adalah biaya untuk sistem pondasi struktur cukup besar. Sistem tambat *vertical tention leg* pada strukur *Floating Wind Turbine* tipe *Spar* seperti ditunjukkan pada gambar.



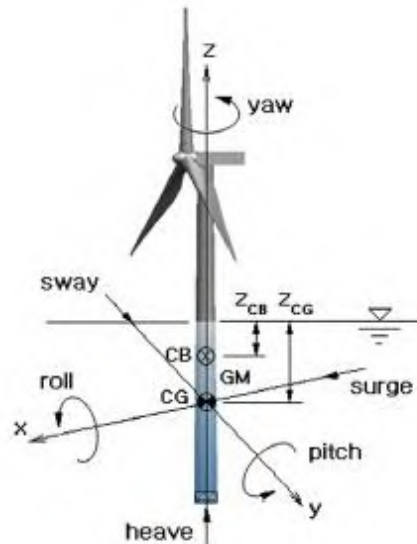
Gambar 2. 3 FWT Tipe Spar dengan Sistem Tambat *Tension Leg*
Karimirad, (2011)

2.2.4 Persamaan Gerak Pada *Floating Wind Turbine*

Menurut Jeon (2013) pada dasarnya gerakan pada struktur FWT sama dengan gerakan *floating structures* atau *compliant structures* lainnya, yakni memiliki enam (6) derajat kebebasan.

- Gerakan Translasi
 - *Surge* yaitu gerakan transversal arah sumbu x
 - *Sway* yaitu gerakan transversal arah sumbu y
 - *Heave* yaitu gerakan transversal arah sumbu z

- Gerakan Rotasional
 - *Roll* yaitu gerakan rotasional terhadap sumbu x
 - *Pitch* yaitu gerakan rotasional terhadap sumbu y
 - *Yaw* yaitu gerakan rotasional terhadap sumbu z



Gambar 2. 4 Gerkan FWT Tipe Spar dalam 6 derajat kebebasan
Jeon et al, (2013)

Sutomo (1999) mengemukakan bahwa Faktor yang menentukan pada analisa persamaan gerakan adalah massa, redaman, dan kekakuan. Persamaan gerak dari *surface platform* pada 6 derajat kebebasan dapat ditulis sebagai berikut.

$$(M + M_A)\ddot{X} + B_V|\dot{X}|\dot{X} + B_P\dot{X} + (K + K_m)X = F_{(t)} \dots\dots\dots 2. 1$$

Dimana :

- \ddot{X} = percepatan pada gerak *surge, heave, sway, roll, pitch* dan *yaw*
- \dot{X} = kecepatan pada gerak *surge, heave, sway, roll, pitch* dan *yaw*
- X = displasemen pada gerak *surge, heave, sway, roll, pitch* dan *yaw*
- M = massa struktur FWT
- M_A = massa tambah pada gerak *surge, heave, sway, roll, pitch* dan *yaw*
- B_V = *drag induced viscous dumping*
- B_P = *potential dumping structure*

K = kekakuan hidrostatik
 K_m = kekakuan dari *rod connector*
 $F(t)$ = gaya eksitasi

Massa struktur untuk gerakan translasi :

$$\begin{aligned}
 m_{11} = surge &= \rho \cdot V \dots\dots\dots 2.2 \\
 m_{22} = sway &= \rho \cdot V \dots\dots\dots 2.3 \\
 m_{33} = heave &= \rho \cdot V \dots\dots\dots 2.4
 \end{aligned}$$

Massa struktur untuk gerakan rotasi :

$$\begin{aligned}
 m_{44} = roll &= \rho \cdot V \cdot R_{xx}^2 \dots\dots\dots 2.5 \\
 m_{55} = pitch &= \rho \cdot V \cdot R_{yy}^2 \dots\dots\dots 2.6 \\
 m_{66} = yaw &= \rho \cdot V \cdot R_{zz}^2 \dots\dots\dots 2.7
 \end{aligned}$$

Dimana :

V : Volume struktur (m^3)
 R_{xx} : Jari-jari girasi arah *roll* (m)
 R_{yy} : Jari-jari girasi arah *pitch* (m)
 R_{zz} : Jari-jari girasi arah *yaw* (m)

Gerakan platform mengakibatkan partikel air yang berada disekeliling platform mengalami percepatan sehingga menimbulkan gaya inersia hidrodinamis. Besar gaya ini proporsional dengan percepatan yang ditimbulkannya dan koefisien proporsionalitasnya dikenal dengan masa tambah (*added mass*). Gaya inersia dan massa tambah yang terjadi akibat percepatan partikel gelombang ini arahnya akan berlawanan dengan arah percepatannya. Dalam perhitungan massa tambah ini, percepatan yang diperhitungkan hanyalah komponen percepatan yang tegak lurus terhadap sumbu silinder dan tiap-tiap elemen platform. Sementara itu koefisien masa tambah silinder yang dipercepat secara axial, efek permukaan bebas dan interaksi antar member yang berdekatan diabaikan. Untuk suku redaman dapat dicari dengan pendekatan sebagai berikut (Sutomo, 1999) :

$$\frac{8}{3\pi} c_2(\omega x_{max}) \dots\dots\dots 2. 8$$

Dimana x_{max} tidak diketahui sebelum penyelesaiannya diketahui. Penyelesaian ini dapat diperoleh dengan cara sebagai berikut:

1. Pertama-tama diestimasi harga x_{max} dengan memakai harga redaman = 10% harga kritis $x_{max} = 0.1 \times M_k$
2. Gunakan x_{max} dari (1) diatas untuk mendapatkan x_{min}
3. Ulangi hingga diperoleh perbedaan dengan toleransi yang diterima

Kekakuan (k) timbul akibat gaya hidrostatik, yang disebut *hydrostatic stiffness* (sutomo, 1999). Menurut Patel dan Witz (1991), kekakuan hidrostatik *hull* untuk gerakan arah *surge*, *sway*, dan *yaw* adalah nol. Kekakuan hidrostatik untuk gerakan *heave*, *roll*, dan *pitch* dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$k_{33} = \text{heave} = \rho \cdot g \cdot V \cdot \sum A_w \dots\dots\dots 2. 9$$

$$k_{44} = \text{roll} = \rho \cdot g \cdot V \cdot (GM)_r \dots\dots\dots 2. 10$$

$$k_{55} = \text{pitch} = \rho \cdot g \cdot V \cdot (GM)_p \dots\dots\dots 2. 11$$

Dimana :

A_w : Luas bidang air struktur

GM : jarak titik berat ke *metacenter hull*

Persamaan berikut adalah persamaan gerak dari *surface platform* pada 6 derajat kebebasan. *Displacement* (X) dapat dicari dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$X = A \cos \omega_n t + B \sin \omega_n t \dots\dots\dots 2. 12$$

$$\omega_n = \sqrt{\left(\frac{K}{M}\right)} \dots\dots\dots 2. 13$$

dimana :

ω_n = frekuensi natural dari struktur yang ditinjau

K = kekakuan dari struktur

M = massa dari struktur

2.2.5 Konsep Pembebanan

Menurut Soedjono (1999) dalam mendesain bangunan apung harus memperhatikan dua hal berikut yakni kriteria operasional dan kriteria ekonomi. Kriteria operasional mempertimbangkan keandalan dari struktur bangunan apung tersebut agar tidak mengalami kegagalan saat beroperasi. Struktur yang dirancang diharapkan mampu menahan semua beban yang berkeja padanya. Secara garis besar terdapat tiga jenis beban yang bekerja pada struktur bangunan lepas pantai yaitu,

- Beban Mati (*Dead Load*)

Beban mati adalah beban pada struktur yang tidak mengalami perubahan dalam kurung waktu operasinya, meliputi berat struktur itu sendiri, berat peralatan atau permesinan yang tidak digunakan pada saat proses pengeboran, dan berat perlengkapan lain yang dipasang permanen pada struktur seperti *boat landing*, *barge bumper* dan lain-lain.

- Beban Hidup (*Live Load*)

Beban hidup adalah beban pada struktur bangunan lepas pantai yang mengalami perubahan dari mode operasi satu ke mode operasi yang lain, misalnya, bahan bakar, awak anjungan lepas pantai, makanan dan minuman, getaran mesin dan lain sebagainya.

- Beban lingkungan (*Environment Load*)

Beban lingkungan adalah beban yang diakibatkan oleh kondisi lingkungan tempat operasi bangunan apung tersebut, misalnya angin, gelombang, arus, dan gempa. Beban tersebut sangat dibutuhkan untuk menganalisa perilaku dinamis bangunan apung, analisa sistem tambat dan lain-lain.

2.2.6 Beban Gelombang

Indiyono, (2003) mengemukakan bahwa beban lingkungan yang paling signifikan berpengaruh pada struktur bangunan lepas pantai adalah gaya gelombang. Terdapat dua metode dalam perhitungan gaya gelombang yaitu metode pendekatan morison dan pendekatan difraksi. Syarat dalam memilih metode untuk perhitungan gaya gelombang didasarkan pada perbandingan antara diameter struktur (D) dengan panjang gelombang (λ) sebagai berikut.

- $D/\lambda > 1$: gelombang mendekati pemantulan murni, persamaan morison tidak dapat digunakan (tidak valid)
- $D/\lambda > 0.2$: difraksi gelombang harus diperhitungkan, persamaan morison tidak valid
- $D/\lambda < 0.2$: persamaan morison dapat digunakan

Pada gaya gelombang *time series* dapat dibangkitkan dari spektrum gelombang sebagai *first order* dan *second order*. *First order* merupakan gelombang dengan periode yang relative kecil yang pembangkitannya di daerah gelombang itu sendiri dan memiliki pengaruh yang dominan pada *motion* bangunan apung. Persamaan gaya gelombang *first order* adalah sebagai berikut.

$$F_{wv}^{(1)}(t) = \sum_{i=1}^N F_{wv}^{(1)}(\omega_i) \cos[\omega_i t + \varepsilon_i] a_i \dots\dots\dots 2. 14$$

dimana :

- $F_{wv}^{(1)}(t)$ = gaya gelombang *first order* tergantung waktu
- $F_{wv}^{(1)}(\omega)$ = gaya *exciting* gelombang *first order* per unit amplitudo gelombang
- ε_i = sudut fase komponen gelombang *first order*
- a_i = amplitudo komponen gelombang *first order* ($\sqrt{2 S(\omega) d\omega}$)
- $S(\omega)$ = fungsi spektra gelombang

Second Order adalah gelombang yang memiliki periode yang besar dan daerah pembangkitannya berada jauh dari lokasi gelombang yang terjadi dan berpengaruh dominan pada kekuatan *tendon*. Persamaan gaya gelombang *second order* adalah sebagai berikut.

$$F_{wv}^{(1)}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_i a_j D_{ij} \cos[(\omega_i - \omega_j) + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)] \dots\dots\dots 2. 15$$

Dimana :

D_{ij} = drift force per unit amplitudo gelombang

2.2.7 Spektrum Gelombang

Gelombang regular memuat energi, yang diidentifikasi pada setiap unit atau satuan luas permukaannya adalah ekuivalen dengan harga kuadrat amplitudonya. Mengacu pada hal ini maka energi yang dimuat dalam sebuah gelombang acak merupakan penjumlahan energy yang dikontribusikan oleh semua komponen gelombang regulernya (Djatkiko, 2012).

Dalam Tugas Akhirnya Akhbar (2015) bahwa pemilihan spektrum energi gelombang didasarkan pada kondisi real laut yang ditinjau. Penentuan spektrum energi gelombang juga dapat menggunakan model spektrum yang dikeluarkan oleh institusi dengan memperhatikan kesamaan fisik lingkungan. Parameter-parameter gelombang dapat diketahui dari spektrum gelombang.:

Tabel 2. 1 Amplitudo dan tinggi gelombang pada spektrum

Profil Gelombang	Amplitudo	Tinggi
Gelombang rata-rata	$1,25\sqrt{m_0}$	$2,5\sqrt{m_0}$
Gelombang signifikan	$2,00\sqrt{m_0}$	$4,00\sqrt{m_0}$
Rata-rata 1/10 gelombang tertinggi	$2,55\sqrt{m_0}$	$5,00\sqrt{m_0}$
Rata-rata 1/1000 gelombang tertinggi	$3,44\sqrt{m_0}$	$6,67\sqrt{m_0}$

Dengan :

m_o = luasan dibawah kurva spektrum (*zero moment*)

$$m_o = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega \dots\dots\dots 2. 16$$

(Akhbar, 2015)

Formulasi spektra JONSWAP akhir-akhir ini banyak dipakai dalam perancangan dan analisis bangunan lepas pantai yang dioperasikan di Indonesia. Hal ini cukup dapat dimengerti karena perairan di Indonesia merupakan perairan kepulauan atau perairan tertutup. JONSWAP adalah singkatan dari *Joint North Sea Wave Project*, yakni proyek yang dilakukan secara bersama-sama oleh sejumlah negara untuk melakukan penelitian gelombang diperairan Laut Utara. (Djarmiko, 2012).

Menurut laporan dari Hasselman dkk (1973,1978) dalam (Djarmiko, 2012) Persamaan spektrum JONSWAP merupakan modifikasi dari spektrum Pierson-Morkowitz dengan memasukan parameter-parameter yang akan mengakomodasi karakteristik gelombang perairan tertutup atau kepulauan. Persamaan spektra JONSWAP mempunyai bentuk yang lebih kompleks bila dibandingkan dengan persamaan-persamaan spektra lainnya.

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp\{-1.25(\omega/\omega_0)^{-4}\} \gamma^{\exp\left\{\frac{(\omega-\omega_0)^2}{2\tau\omega_0^2}\right\}} \dots\dots\dots 2. 17$$

dimana :

$S(\omega)$ = spektrum gelombang

α = $0.076 (X_0)^{-0.22}$

X_0 = gX/U_w^2

X = panjang *fetch*

U_w = kecepatan angin

α = 0.0081 jika X tidak diketahui

γ = parameter ketinggian atau peakedness parameter, yang harganya dapat bervariasi antara 1.0 sampai dengan 7.0. untuk Laut Indonesia mempunyai harga 2.5

τ = parameter bentuk atau *shape parameter*

$\tau = 0.07$ jika $\omega \leq \omega_0$

$\tau = 0.07$ jika $\omega > \omega_0$

$\omega_0 = 2\pi(g/U_w)(X_0)^{-0.33}$

(Djarmiko, 2012).

2.2.8 Frekuensi dan Periode Natural

Djarmiko (2012) dalam bukunya menjelaskan bahwa frekuensi, dan sebaliknya periode natural penting untuk diketahui dari suatu sistem dinamis yang bergerak dalam mode osilasi, seperti bangunan apung dan kapal diatas gelombang. Pemahaman tentang frekuensi alami akan memberikan acuan bagi perancang, pada tahap perancangan, atau operator, pada tahap pengoperasian untuk menghindari terjadinya resonansi dengan gaya eksitasi. Telah dipahami bahwa resonansi akan menjadikan respon, gerakan bangunan apung dalam hal ini, menjadi berlebihan, dan selanjutnya akan membahayakan keselamatannya. Pada bangunan yang mengapung bebas tanpa pengikatan, hanya akan ada tiga *mode* yang mempunyai frekuensi alami, yakni pada *mode heave*, *roll*, dan *pitch*. Sedangkan *mode* lainnya tidak mempunyai frekuensi alami, karena secara teknis tidak mempunyai mekanisme kekakuan sendiri, yang akan bermanifestasi menjadi gaya pengembali. Frekuensi alami dapat dijelaskan dengan persamaan dibawah ini.

Frekuensi alami gerakan *heave*

$$\omega_{nz} \sqrt{\frac{k_{33}}{m_{33}+a_{33}}} = \sqrt{\frac{\rho \cdot g \cdot A_w}{m_{33}+a_{33}}} \dots\dots\dots 2. 18$$

Frekuensi alami gerakan *roll*

$$\omega_{n\phi} \sqrt{\frac{k_{44}}{I_{44}+a_{44}}} = \sqrt{\frac{\rho \cdot g \cdot \nabla \cdot GM_T}{I_{44}+a_{44}}} \dots\dots\dots 2. 19$$

Frekuensi alami gerakan *pitch*

$$\omega_{n\theta} \sqrt{\frac{k_{55}}{I_{55}+a_{55}}} = \sqrt{\frac{\rho \cdot g \cdot \nabla \cdot GM_L}{I_{55}+a_{55}}} \dots\dots\dots 2. 20$$

dimana :

- k_{33} = kekakuan gerakan *heave* (kN)
- k_{44} = kekakuan gerakan *roll* (kN)
- k_{55} = kekakuan gerakan *pitch* (kN)
- m = massa atau displasemen bangunan apung (ton)
- I_{44} = momen inersia massa untuk gerakan *roll* (ton.m²)
- I_{55} = momen inersia massa untuk gerakan *pitch* (ton.m²)
- a_{33} = massa tambah untuk gerakan *heave*
- a_{44} = momen inersia massa tambah untuk gerakan *roll* (ton.m²)
- a_{55} = momen inersia massa tambah untuk gerakan *pitch* (ton.m²)
- ρ = massa jenis air laut (1.025 ton/m³)
- g = percepatan gravitasi (9.81 m/s²)
- A_w = luas garis air (m²)
- V = volume displasemen bangunan apung (m³)
- GM_T = tinggi metasentra melintang (m)
- GM_L = tinggi metasentra memanjang (m)

2.2.9 Response Amplitudo Operator

Setelah menjelaskan dengan seksama tentang teori gerakan bangunan laut, pada akhirnya hasil yang diperlukan oleh perancang, serta pada tahap tertentu oleh operator adalah informasi tentang karakteristik gerakan itu sendiri. Informasi ini pada umumnya disajikan dalam bentuk grafik, dimana absisnya adalah berupa parameter frekuensi, sedangkan ordinatnya adalah merupakan rasio antara amplitudo gerakan pada *mode* tertentu, dengan amplitudo gelombang yang dikenal dengan *response amplitude operator* (RAO) (Djarmiko, 2012).

Djarmiko (2012) menjelaskan bahwa respons gerakan RAO, untuk gerakan translasi, yakni : *surge*, *sway*, dan *heave* adalah merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakannya dibanding dengan amplitudo gelombang insiden (keduanya dalam satuan panjang) :

$$RAO = \frac{\zeta_{ko}}{\zeta_o} \dots\dots\dots 2. 21$$

Sedangkan respon non-dimensi atau RAO untuk gerakan rotasi , yakni, *roll*, *pitch*, dan *yaw* adalah merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi (dalam radian) dengan kemiringan gelombang, yakni merupakan perkalian antara angka gelombang dengan amplitudo gelombang insiden, $k_w = \omega^2/g$:

$$RAO = \frac{\zeta_{k0}}{k_w \zeta_0} \dots\dots\dots 2. 22$$

Menurut Chakrabarti (1986) *Response Amplitudo Operator* (RAO) merupakan fungsi respon gerakan dinamis struktur yang disebabkan oleh gelombang dengan rentang frekuensi tertentu. Persaman RAO menurut Chakrabarti adalah sebagai berikut.

$$RAO(\omega) = \frac{X_p(\omega)}{\eta(\omega)} \dots\dots\dots 2. 23$$

Dimana :

$X_p(\omega)$ = amplitudo struktur

$\eta(\omega)$ = amplitudo gelombang

2.2.10 *Spectrum Response*

Spectrum response didefinisikan sebagai respons kerapatan energi pada pada struktur akibat gelombang. *Spectrum response* diperoleh dengan cara mengalikan spektra gelombang dengan kuadrat RAO, secara matematis diperoleh sebagai berikut.

$$S_R = [RAO(\omega)]^2 S(\omega) \dots\dots\dots 2. 24$$

Dimana :

S_R = *spectrum response* ($m^2 - sec$)

$S(\omega)$ = spektrum gelombang ($m^2 - sec$)

$RAO(\omega)$ = *response amplitude operator*

ω = frekuensi gelombang (rad/sec)

(Chakrabarti, 1987)

2.2.11 Beban Angin

Kecepatan angin adalah parameter penting dalam menghitung gaya angin yang bekerja pada struktur. Gaya Angin pada tiang dan turbin dapat dihitung dengan persamaan umum yang dibahas dalam *Guidelines for design offshore wind turbine DNV*. Gaya-gaya angin yang bekerja pada *wind turbine* (Hendi, 2011).

2.2.11.1 Gaya Angin pada Tiang

Bentuk geometri dari tiang adalah kerucut yang terpotong, sehingga luas permukaan gaya angin pada tiang berbentuk trapezium. Menurut DnV (2002) persamaan gaya angin pada tiang adalah sebagai berikut.

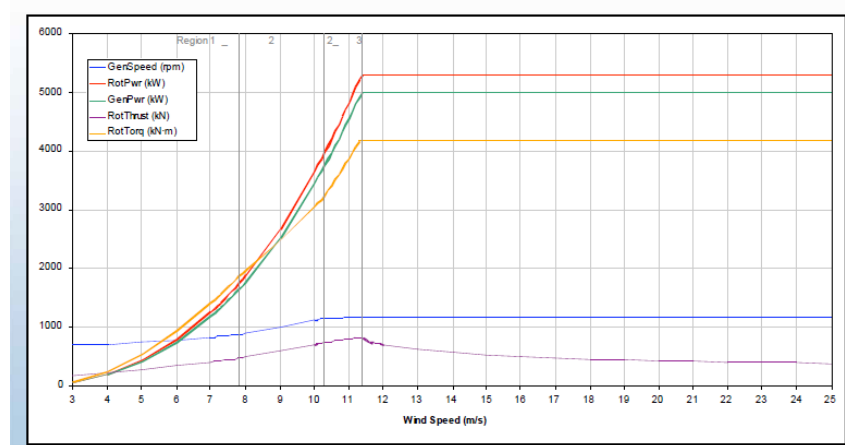
$$F = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V_{wind}^2 \cdot C_D \dots\dots\dots 2.25$$

dimana :

- F = gaya angin pada tiang
- ρ = masa jenis udara
- A = luas daerah yang tegak lurus dengan arah angin
- C_D = Drag Coeficient

2.2.11.2 Gaya Angin pada Turbin

Turbin angin dengan kapasitas 5 MW dipilih untuk disain struktur turbin angin terapung. Kapasitas 5 MW diperkirakan adalah kapasitas maksimum yang harus dihasilkan oleh turbin angin terapung lepas pantai agar sistem ini efektif dari segi biaya (Hendi, 2011).



Gambar 2. 5 Grafik Karakteristik Operasional Turbin Angin
(Jonkman,2009)

Pada saat operasional, *rotor* bergerak akibat angin kemudian turbin memberikan aksi ke struktur pendukung berupa gaya *lateral* (F_{thrust}) dan gaya torsi (F_{torq}).

Dimana :

$$\begin{aligned} RotPower &= Rotor\ Power\ (kW) \\ GenSpeed &= Generator\ Speed\ (rpm) \\ Gen\ Power &= Generator\ Power\ (kW) \\ RotTorq &= Rotor\ Torque\ (F_{torq},\ kN-m) \\ RotThrust &= Rotor\ Thrust\ (F_{thrust},\ kN) \end{aligned}$$

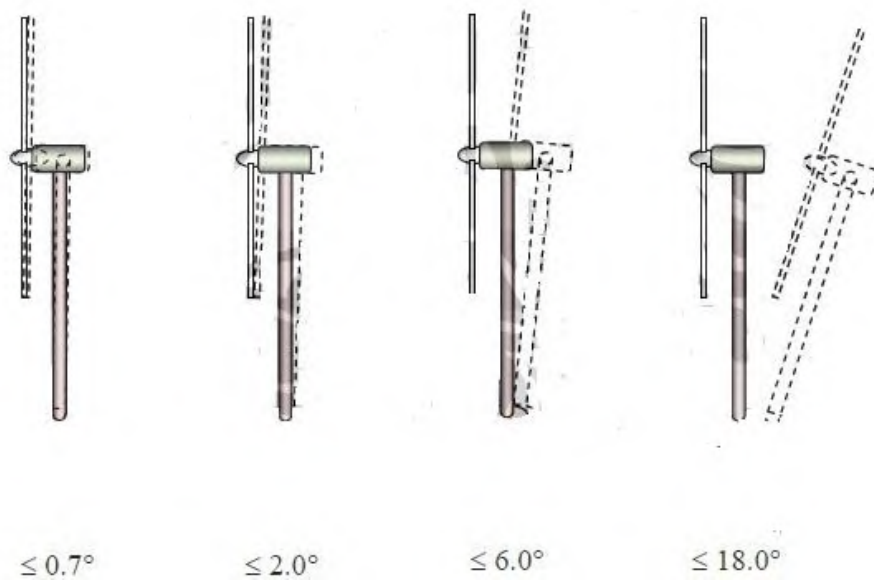
(Hendi, 2011)

Pada gambar 2.5 diatas menunjukkan bahwa, pada kecepatan angin 3 m/s grafik terlihat terpotong. Kecepatan angin tersebut merupakan kecepatan minimum turbin angin untuk bisa bekerja. Grafik pada gambar 6 terdiri dari 3 (tiga) bagian. Bagian pertama adalah bagian saat kecepatan angin $0 \leq V_w \leq 3$ m/s dimana turbin tidak bekerja. Bagian kedua adalah bagian dimana turbin *power* meningkat seiring dengan kecepatan angin. Bagian ketiga adalah bagian dimana turbin angin mempertahankan produksi *power* yang sama walaupun kecepatan angin bertambah. Hal ini dilakukan dengan cara mengatur sudut *pitch* dari *blade*. Kecepatan angin 25 m/s adalah *cut off* kecepatan angin maksimum untuk beroperasinya turbin angin (Hendi, 2011).

2.2.12 Kriteria Stabilitas *Floating Wind Turbine*

Dalam jurnal tesis Hendi (2011) Rick Mercier (2004) menjelaskan bahwa kriteria stabilitas pada turbin angin lepas pantai agar bisa bekerja dapat dilihat dari besarnya *pitch* yang terjadi pada struktur. Kriteria stabilitas struktur turbin angin terapung lepas pantai sebagai berikut :

- *operating* $\leq 0.7^\circ$
- *survival* $\leq 2.0^\circ$
- *stand by* $\leq 6.0^\circ$
- *damaged* $\leq 18.0^\circ$



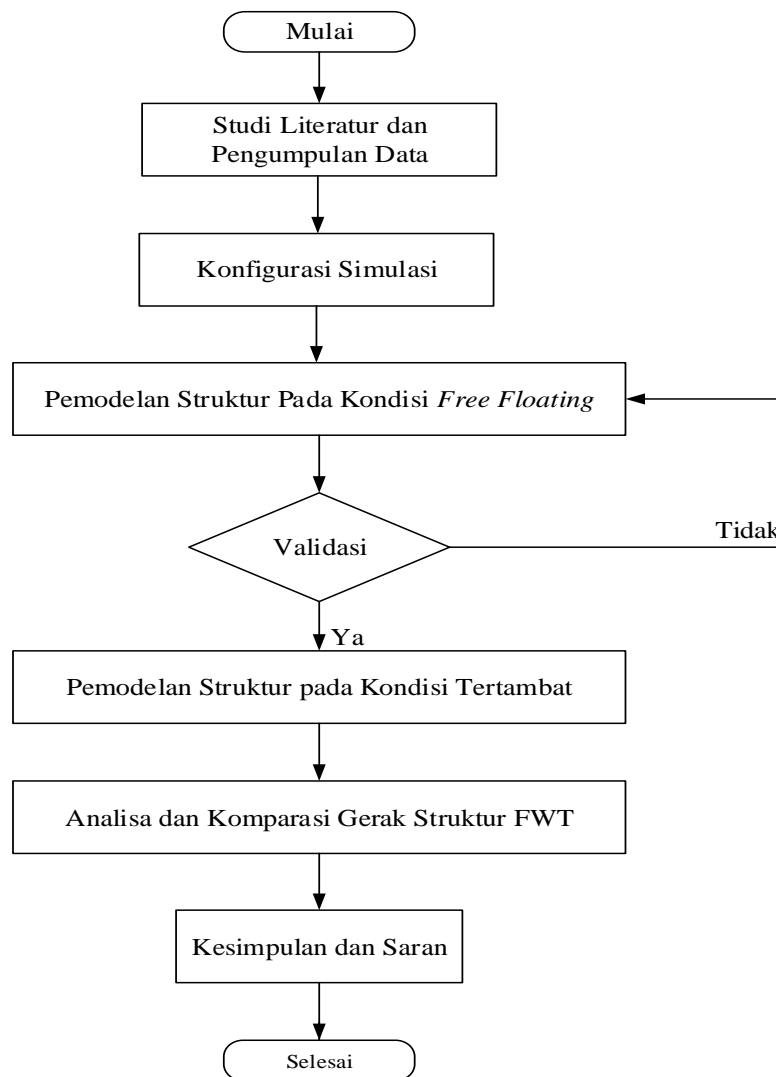
Gambar 2. 6 Kriteria stabilitas derajat kebebasan *pitch*
(Hendi,2011)

Pada kategori *operating*, struktur turbin angin terapung lepas pantai masih dapat beroperasi normal. Kategori *survival* adalah kondisi stabilitas satu tingkat diatas *operating* dimana turbin angin masih dapat bekerja. Pada saat turbin angin dalam kategori *stand by* adalah kondisi dimana turbin angin terapung diberhentikan operasinya atau posisi *parkir*. Kategori *damaged* adalah kondisi yang dapat menyebabkan *overtuning* atau kegagalan struktur (Hendi, 2011).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Metodologi penelitian yang digunakan untuk menyelesaikan masalah penelitian ini digambarkan dalam Diagram Alir sebagai berikut.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Tugas Akhir

3.2 Prosedur Penelitian

Adapun penjelasan dari diagram alir pengerjaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

3.2.1 Studi Literatur

Dilakukan pengumpulan referensi dari buku/diktat kuliah, jurnal, tugas akhir, makalah-makalah, majalah ilmiah maupun informasi yang relevan untuk dijadikan acuan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.

3.2.2 Pengumpulan data

Data-data yang dibutuhkan berupa data struktur *Floating Wind Turbine* tipe *Spar* serta data lingkungan lokasi struktur tersebut ditempatkan berupa data angin dan gelombang. Data *Wind Turbine* yang digunakan adalah *Wind Turbine NREL 5 MW* dan *Floating Structure* berupa *Spar* yang diambil dalam Tesis Thomas Solberg, 2011. Sedangkan lingkungan operasional struktur adalah lingkungan Selat Makassar . Data-data tersebut dapat dilihat dalam tabel 3.1 sampai dengan 3.4.

Tabel 3. 1 Data Lingkungan Selat Makassar, (Dinaryo, 2016)

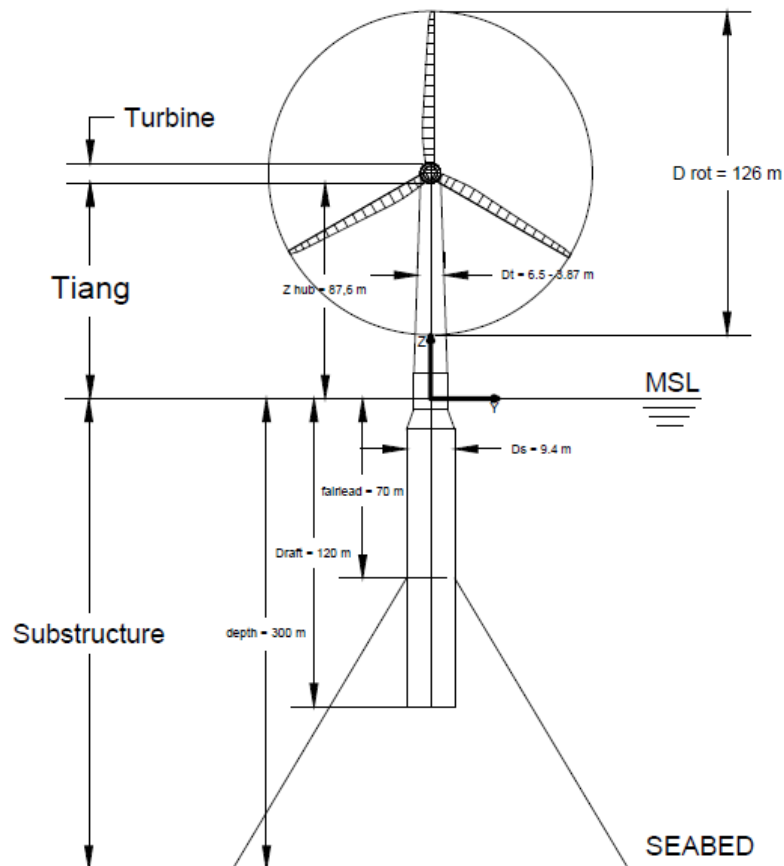
Data Lingkungan 100 Tahunan		
Deskripsi	Unit	Kuantitas
Hs, <i>Significant Height Wave</i>	m	2.351
Tp, <i>Peak Period</i>	s	5.0
Vw, <i>Wind Velocity</i>	m/s	21.0

Tabel 3. 2 Data *Turbine*, NREL (Solberg, 2011)

Deskripsi	Kuantitas	Unit
<i>Rating</i>	5	MW
<i>Maximum Rotor</i>	12.1	rpm
<i>Massa Tower</i> (Termasuk Turbin)	696,900	kg
<i>Diameter Rotor</i>	126	m
<i>Tinggi Tower</i>	87.6	m
<i>Diameter Tower</i> pada bagian Bawah	6.5	m
<i>Diameter Tower</i> pada bagian Atas	3.87	m
<i>Titik Berat Tower</i> (x ; y ; z)	-0.134 ; 0 ; 64.21	m

Tabel 3. 3 Properti *Substructure* FWT (Solberg, 2011)

Deskripsi	Kuantitas	Unit
Tinggi Sarat	120	m
<i>elevation to platform top above SWL</i>	10	m
<i>Depth to Top of Taper bellow SWL</i>	4	m
<i>Depth to End of Taper bellow SWL</i>	12	m
<i>Platform Diametre above Taper</i>	6.5	m
<i>Platform Diametre bellow Taper</i>	9.4	m
Massa Platform	7,466,330.00	kg
Titik Massa Platform dari SWL (X,Y,Z)	(0 , 0 , -89.9155)	m
<i>FWT Roll Inertia about CoG</i>	68,243,000,000.00	Kg.m ²
<i>FWT Pitch Inertia about CoG</i>	68,221,000,000.00	Kg.m ²
<i>FWT Yaw Inertia Inertia about CoG</i>	187,870,000.00	Kg.m ²



Gambar 3. 2 Struktur *Floating Wind Turbine* tipe *Spar*

Tabel 3. 4 Properti *Mooring Line*

Deskripsi	Catenary	Taut	Unit
Diameter	0.09	0.09	m
<i>Stiffness</i>	1000000	1000000	kN
Jumlah	3	3	buah
<i>Angle Between Adjacent Lines</i>	120	120	Deg
<i>Depth to Anchors Below SWL</i>	320	320	m
<i>Depth to Fairleads Below SWL</i>	70	70	m
MBL	8000	8000	kN
<i>Massa Cable</i>	77.0766	77.0766	Kg/m
<i>Length</i>	902.2	451.1	m
<i>Radius to Anchors from Platform CL</i>	853.87	375.49	m

3.2.3 Konfigurasi Simulasi

Simulasi yang dilakukan pada Tugas Akhir ini adalah variasi sistem tambat, dan variasi tinggi sarat air. Selain itu arah pembebanan juga di variasikan pada setiap simulasi. Konfigurasi simulasi yang dilakukan adalah sebagai berikut.

a. Simulasi 1 (satu) : Sistem Tambat

Sistem Tambat yang digunakan berupa sistem tambat *taut* dan *catenary*

Tabel 3. 5 Parameter Simulasi 1

No.	Parameter	Variabel Tetap	Variabel Bebas
1	Sistem Tambat	-	<i>Taut Mooring</i>
			<i>Catenary Mooring</i>
2	Model Struktur	FWT Sarat 120 m	-
3	Kecepatan Angin	21 m/s	-
4	<i>Periode</i> Gelombang	5 s	-
5	Hs, Gelombang Signifikan	2.351 m	-
6	Kedalaman Laut	320 m	-
7	Jumlah <i>Mooring line</i>	3 buah	-

b. Simulasi 2 (dua) : Sistem Tambat dan Model Struktur

Variasi model struktur pada simulasi ini berupa perubahan tinggi sarat air. Perubahan tinggi sarat air dilakukan dengan menambahkan beban pada *floating structure*. Model Struktur awal berupa struktur *Floating Wind Turbine* dengan tinggi sarat air 120 m dan model struktur kedua berupa *Floating Wind Turbine* dengan Sarat 130 m. Model FWT Sarat 130 m diperoleh dengan menambahkan massa pada struktur FWT 120 m. Massa Model FWT 130 m adalah sebesar 115% massa FWT 120 m. Adapun propertis kedua struktur tersebut adalah sebagai berikut.

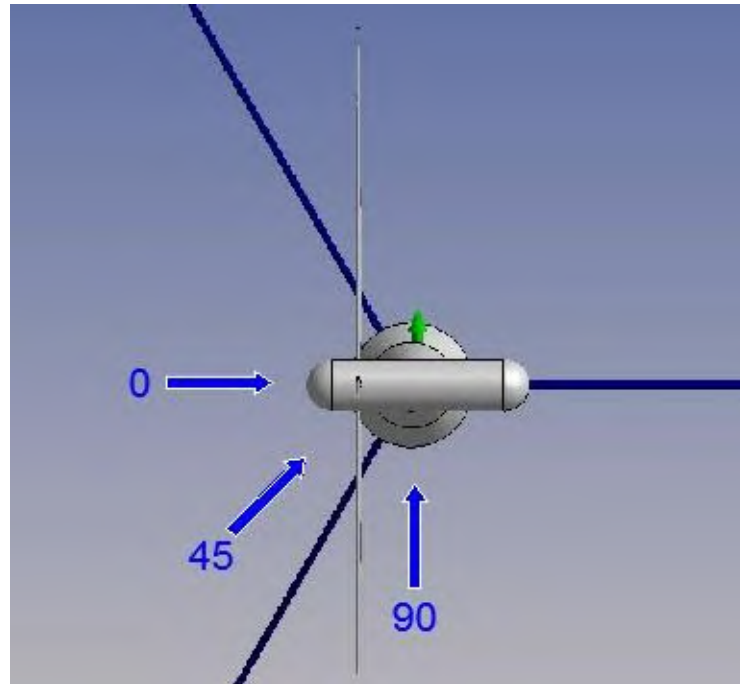
Tabel 3. 6 Propertis Variasi Model FWT

Deskripsi	Model FWT	
	Sarat 120 m	Sarat 130 m
Massa Struktur Turbin (kg)	696900	696900
Massa <i>Floating Platform</i> (kg)	7466330	7873165.9
<i>Centre Of Gravity</i> (m)		
X	-0.0114	-0.011
Y	0	0
Z	-76.758	-77.382
<i>Volume Displacement</i> (m ³)	8029.21	8361.0399
<i>Centre Of Boaucny</i> (m)		
X	0	0
Y	0	0
Z	-62.0657	-69.404

Tabel 3. 7 Parameter Simulasi 2

No.	Parameter	Variabel Tetap	Variabel Bebas
1	Sistem Tambat	-	<i>Taut Mooring</i> <i>Catenary Mooring</i>
2	Model Struktur	-	FWT Sarat 120 m FWT Sarat 130 m
3	Kecepatan Angin	21 m/s	-
4	Periode Gelombang	5 s	-
5	Hs, Gelombang Signifikan	2.351 m	-
6	Kedalaman Laut	320 m	-
7	Jumlah <i>Mooring line</i>	3 buah	-

Adapun variasi arah pembebanan pada setiap simulasi adalah arah *following seas* (0°), *quartering seas* (45°), dan *beam seas* (90°) seperti yang ditunjukkan pada gambar.



Gambar 3. 3 Arah Pembebanan *Floating Wind Turbine*

3.2.4 Pemodelan Struktur dan Validasi

Pemodelan geometri struktur dilakukan dengan menggunakan bantuan *software Auto CAD*, dan *Ansys Desain Modeller*, yaitu dengan mentransformasi bentuk ril struktur menjadi bentuk 3 dimensi yang sesuai dengan data yang ada. Sedangkan pemodelan untuk analisa beban dinamis yang bekerja pada struktur menggunakan bantuan *software Ansys AQWA*. Selanjutnya dilakukan validasi nilai-nilai hidrostatis dari *software ansys* tersebut dengan hasil yang didapatkan dari perhitungan manual dan data tercantum. Model dinyatakan tidak valid apabila melebihi batas *error* yangizinkan oleh ABS Sebesar 5 %. Jika demikian maka model akan didesain ulang hingga memenuhi batas toleransi tersebut sehingga dapat dilakukan analisa lebih lanjut.

3.2.5 Analisa Respon Gerak dan Validasi

Analisa respon gerak pada gelombang regular ditinjau pada 6 derajat kebebasan struktur kondisi *freefloating*. Hasilnya berupa *Response Amplitude Operator* (RAO) derajat kebebasan *Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, dan Yaw*.

Kemudian dilakukan proses validasi dengan cara membandingkan periode natural dari hasil komputasi *Ansys Aqwa* dengan standar yang berlaku. Validasi Periode natural struktur mengacu pada *DNV F205* berupa struktur *Deep Draught Floating* dengan periode natural sebagai berikut.

Tabel 3. 8 Periode Natural *Deep Draught Floating*, DNV F205

Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
>100	>100	20-35	40-90	40-90	>100

3.2.6 Pemodelan struktur pada kondisi tertambat

Analisa pada kondisi tertambat dimodelkan pada *software Ansys Aqwa*. Pada pemodelan ini dilakukan penentuan formulasi spektra respon gelombang yang akan digunakan. Dikarenakan lingkungan operasional struktur terletak di daerah Selat Makassar maka dipilih Formulasi JONSWAP yang dapat mengakomodasi karakteristik gelombang perairan kepulauan.

3.2.7 Analisa Komparasi Respon Gerak Struktur

Hasil output pemodelan berupa karakteristik gerak struktur pada setiap variasi dianalisa dan kemudian dibandingkan .

3.2.8 Kesimpulan

Dari perbandingan gerak struktur tersebut maka akan diperoleh model dengan respon gerak terbaik.

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Simulasi Sistem Tambat

Pada simulasi ini akan membandingkan respon gerak struktur kondisi tertambat. Konfigurasi sistem tambat yang dibandingkan pada simulasi ini adalah sistem tambat *taut* dan sistem tambat *catenary*.

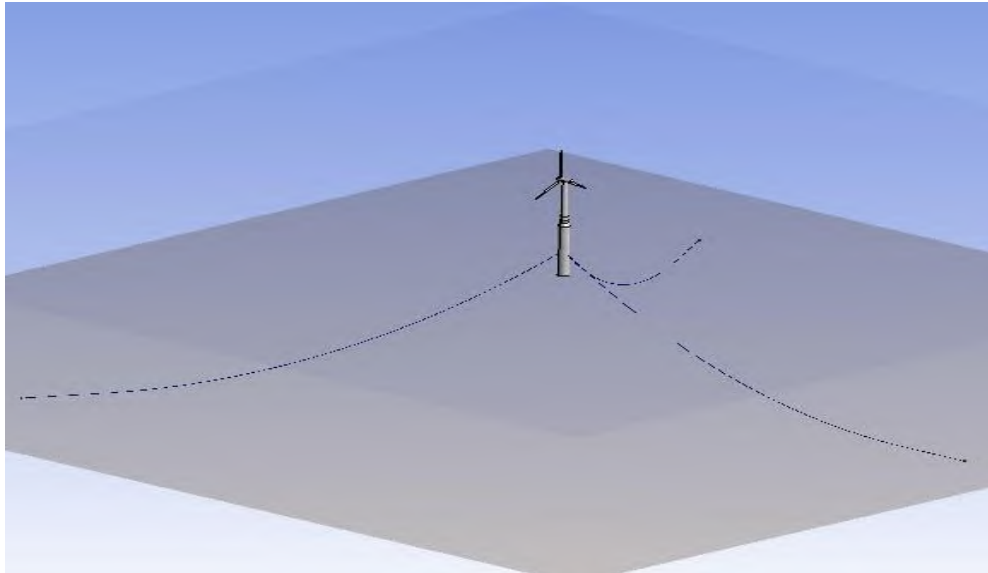
4.1.1 Pemodelan Struktur *Floating Wind Turbine*

Dalam penelitian ini proses pemodelan dilakukan dengan menggunakan bantuan *software Auto CAD* dan *ANSYS Design Modeler*. Dalam simulasi ini konfigurasi struktur yang digunakan adalah *Floating Wind Turbine* dengan tinggi sarat air 120 m. Keseluruhan pengaruh beban dinamis yang bekerja pada struktur dianalisa dengan menggunakan bantuan *ANSYS AQWA*. Pemodelan diawali dengan pemodelan struktur tanpa sistem tambat. Hasil dari pemodelan dapat dilihat sebagai berikut :

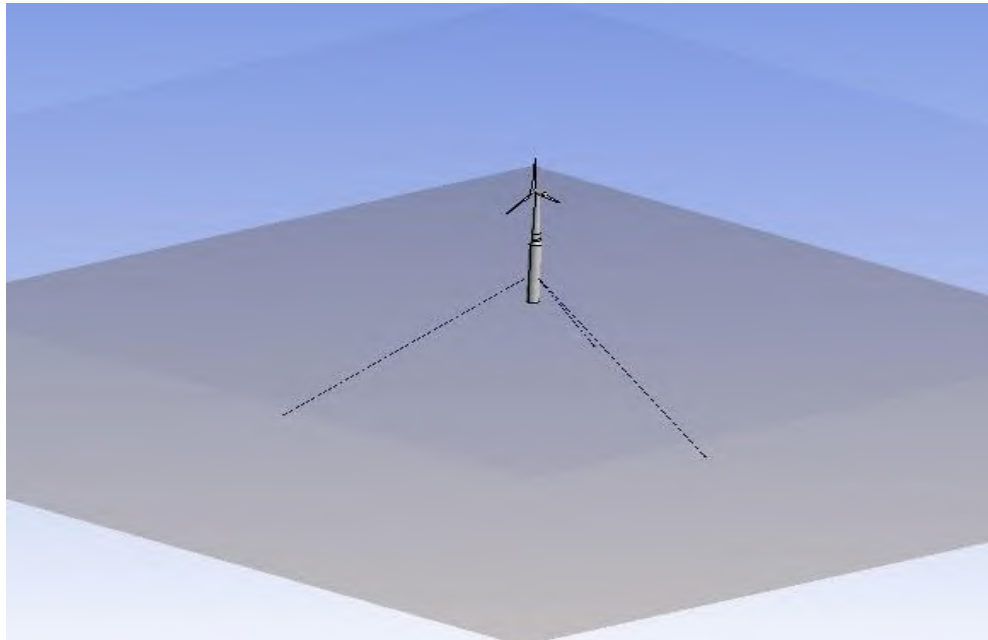


Gambar 4. 1 Model Geometri Struktur *Floating Wind Turbine* kondisi *Free Floating*

Selanjutnya, struktur *floating wind turbine* dimodelkan pada kondisi tertambat dengan sistem tambat *taut* dan sistem tambat *catenary*. Adapaun hasil pemodelannya dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 4. 2 Model *Geometri Floating Wind Turbine* dengan sistem tambat *catenary*



Gambar 4. 3 Model *Geometri Floating Wind Turbine* dengan sistem tambat *taut*

4.1.2 Validasi Pemodelan Struktur *Floating Wind Turbine*

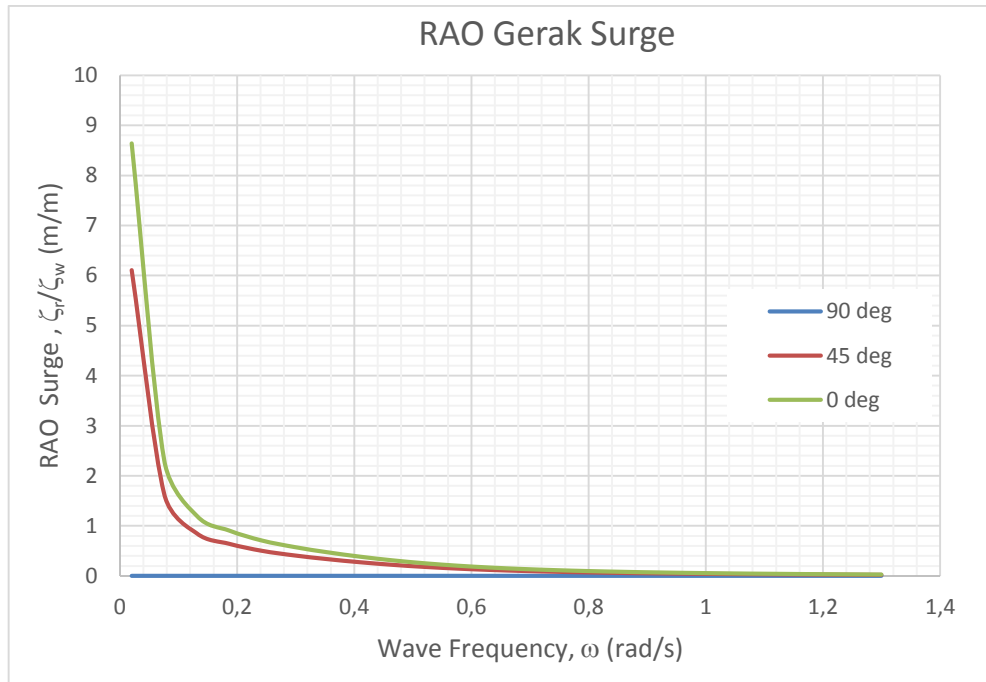
Struktur yang telah dimodelkan dengan bantuan software diperiksa kevalidannya dengan membandingkan hasil keluaran dari *software* dan hasil perhitungan manual. Validasi pada penelitian ini ditinjau pada nilai tinggi *Gravity to Metacentre (GM)*, *Volume Displacement*, COG, COB, dan frekuensi natural. Kriteria validasi mengacu pada ABS dengan batas toleransi perbedaan keduanya bernilai maksimum 5%.

Tabel 4. 1 Perbandingan Hasil Pemodelan Struktur FWT Sarat 120 M

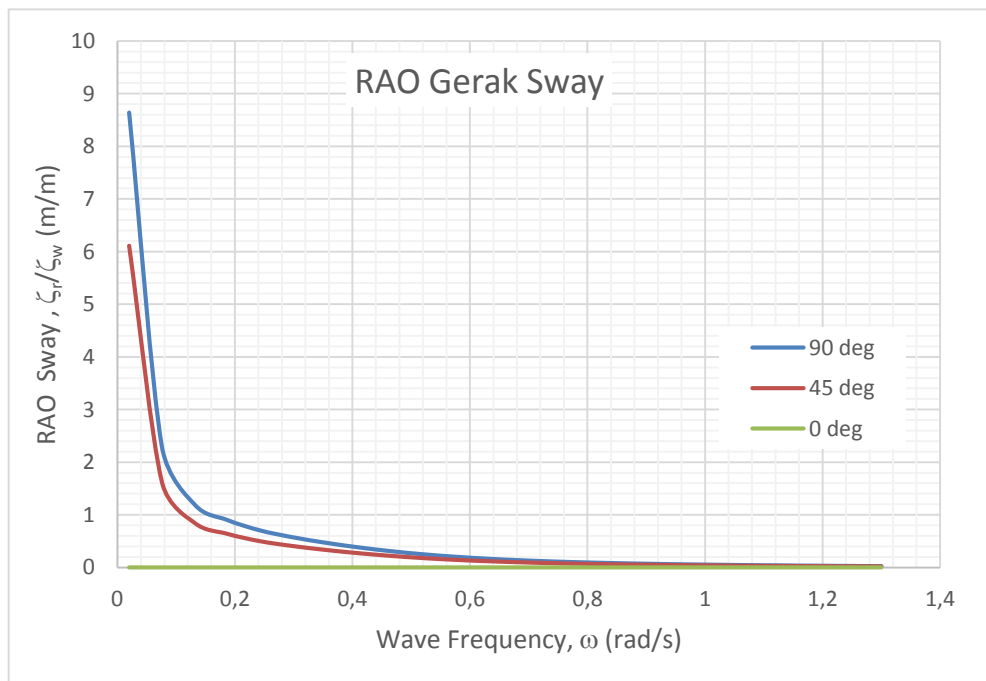
	Unit	Hitungan	<i>Ansys</i>	Koreksi	Ket
GM	m	14.703	14.48	1.52%	OK
CoB	m	-62.066	-62.0657	-0.0001%	OK
CoG	m	-76.758	-76.758	0.00%	OK
<i>Volume Displacement</i>	m ³	8029.21	7964.127	0.81%	OK
Frekuensi Natural <i>Heave</i>	m/m	0.2	0.195	2.70%	OK
Frekuensi Natural <i>Roll</i>	deg/m	0.131	0.129	1.35%	OK
Frekuensi Natural <i>Pitch</i>	deg/m	0.132	0.13	2.19%	OK

4.1.3 Analisa Respon Gerak Struktur Pada Gelombang Reguler

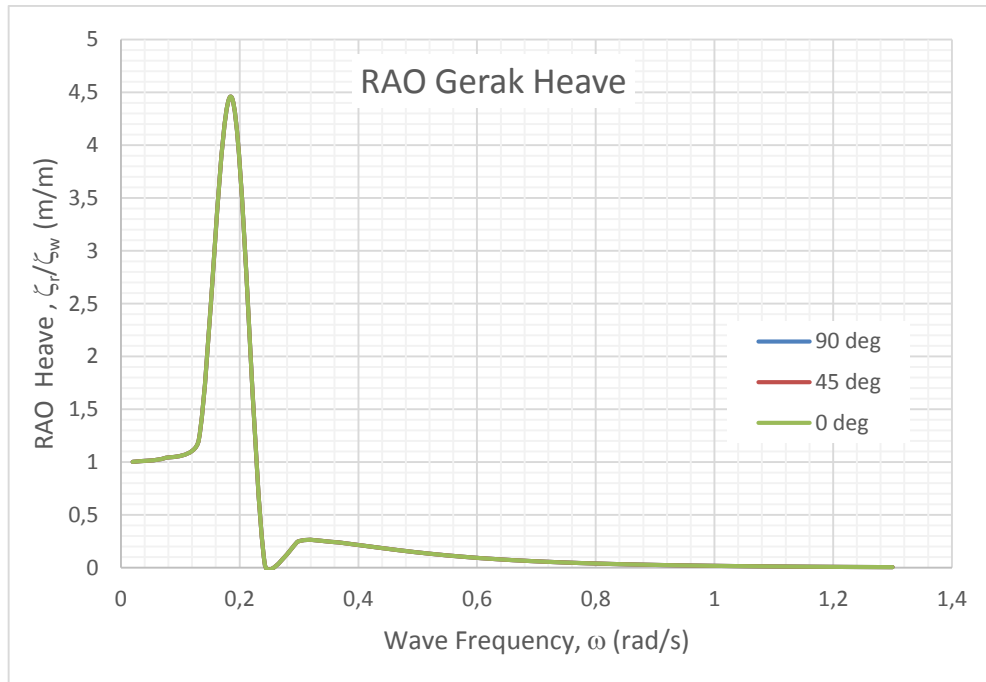
Hasil dari komputasi gerak struktur diatas gelombang regular disajikan dalam bentuk kurva-kurva *Response Amplitude Operator (RAO)* pada gerak translasi dan rotasi, seperti yang ditunjukkan pada gambar. Pemodelan dilakukan dengan bervariasi 3 (tiga) arah pemebaban, yakni 0°, 45°, 90° dan rentang frekuensi antara 0.02 rad/s sampai dengan 1.3 rad/s dengan interval 0.0556 rad/s. Berikut ini adalah kurva RAO *Floating Wind Turbine* kondisi *free floating*.



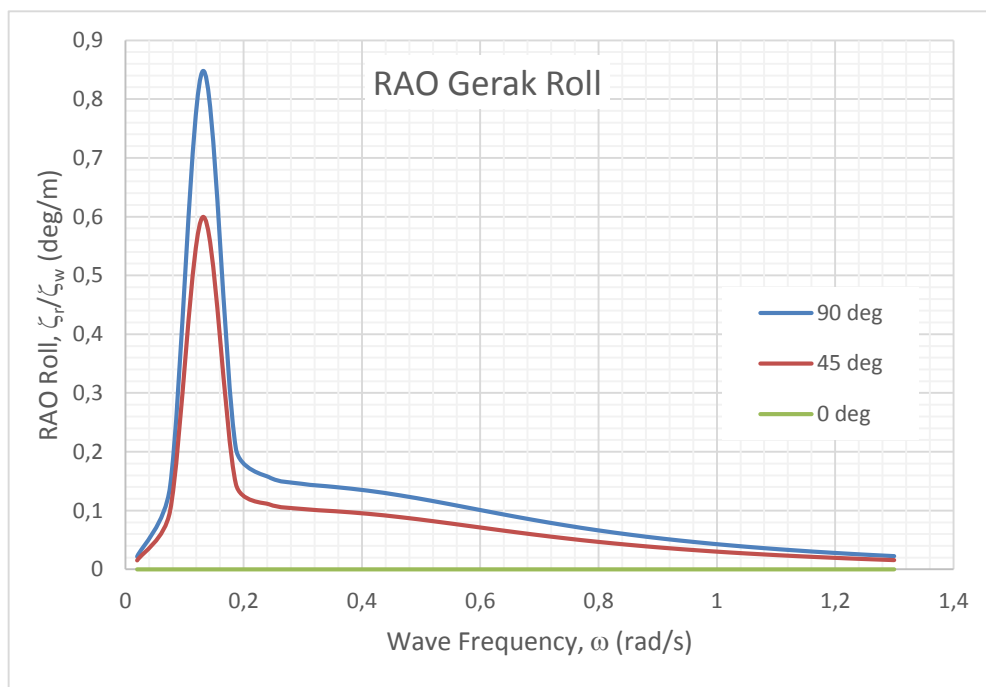
Gambar 4. 4 Grafik RAO Gerak *Surge* pada kondisi *Free Floating*



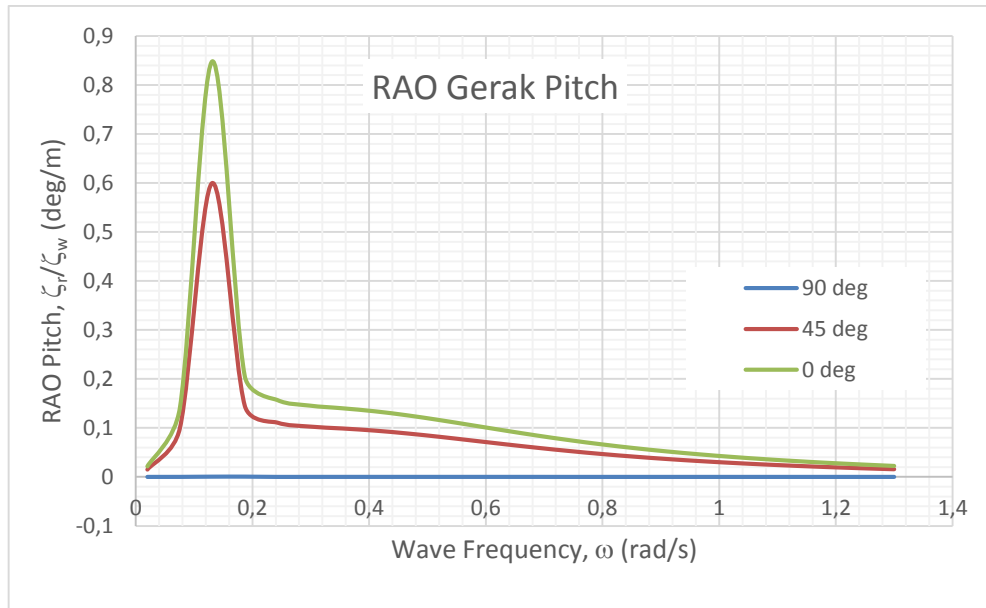
Gambar 4. 5 Grafik RAO Gerak *Sway* pada kondisi *Free Floating*



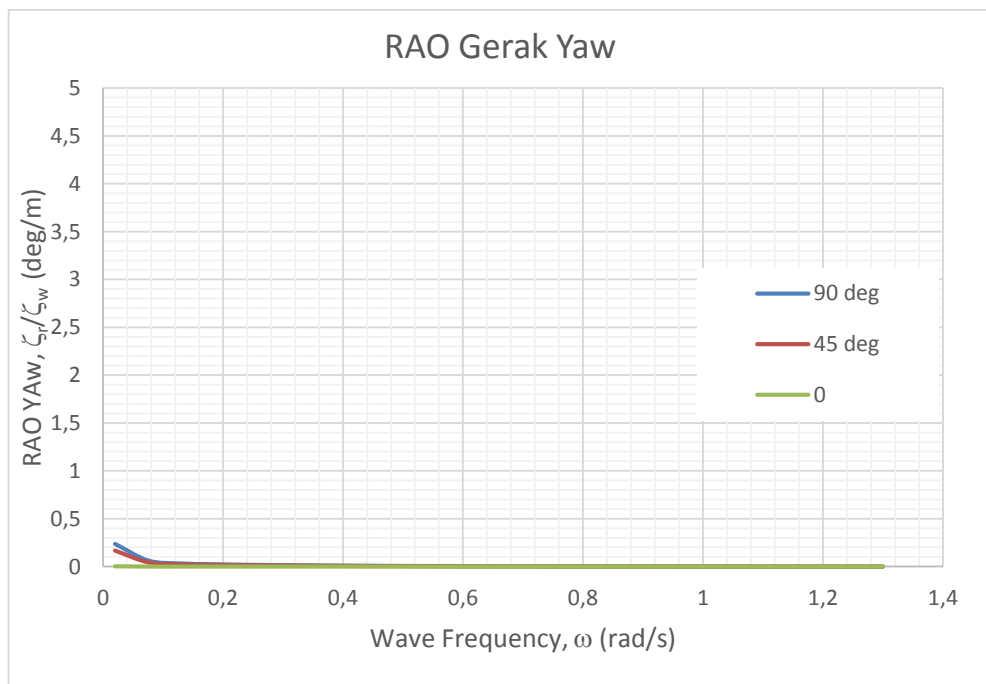
Gambar 4. 6 Grafik RAO Gerak *Heave* pada kondisi *Free Floating*



Gambar 4. 7 Grafik RAO Gerak *Roll* pada kondisi *Free Floating*



Gambar 4. 8 Grafik RAO Gerak *Pitch* pada kondisi *Free Floating*



Gambar 4. 9 Grafik RAO Gerak *Yaw* pada kondisi *Free Floating*

Dari keseluruhan grafik diatas menunjukkan bahwa nilai RAO *surge* pada arah pembebanan 0° sama dengan nilai RAO *sway* arah 90°, begitu pula nilai RAO *roll* pada arah pembebanan 0° memiliki nilai yang sama dengan besar RAO *pitch* pada arah pembebanan 90°. Sedangkan pada gerak *heave* dan *yaw*

memiliki nilai RAO yang sama pada semua arah pembebanan. Hal tersebut dikarenakan *hull* struktur berbentuk simetris. Analisa respon struktur kondisi *free floating* ini dimaksudkan untuk membandingkan dengan analisa pada kondisi tertambat.

Setelah mendapatkan nilai RAO, maka dapat diketahui frekuensi dan periode natural dari setiap *mode* gerakan. Selanjutnya dilakukan validasi respon gerak struktur dengan menggunakan acuan *code* DnV RP-F205. *Struktur Floating Wind Turbine* yang berbentuk *spar buo*, menurut DnV tergolong dalam struktur *Deep Draught Floaters* (DDF) dengan rincian seperti dibawah ini.

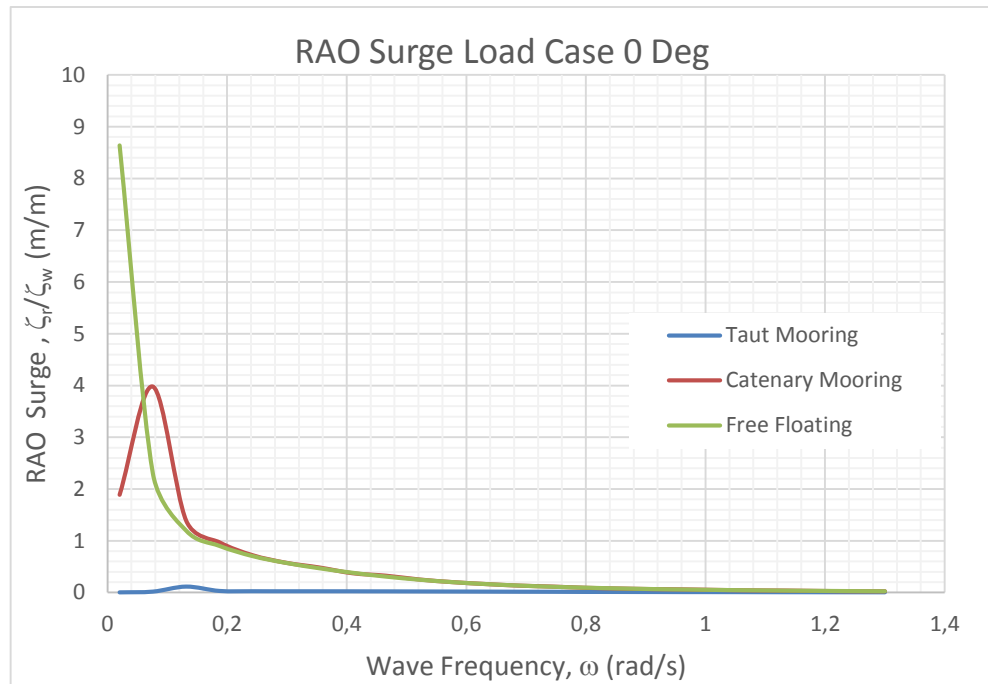
Tabel 4. 2 Validasi Periode Natural Struktur

Gerak Gerakan	unit	Periode Natural		Validasi
		DnV RP-F250	Model Ansys	
<i>Surge</i>	m/m	>100	314.159	OK
<i>Sway</i>	m/m	>100	314.159	OK
<i>Heave</i>	m/m	20-35	33.607	OK
<i>Roll</i>	deg/m	40-90	48.707	OK
<i>Pitch</i>	deg/m	40-90	48.707	OK
<i>Yaw</i>	deg/m	>100	314.159	OK

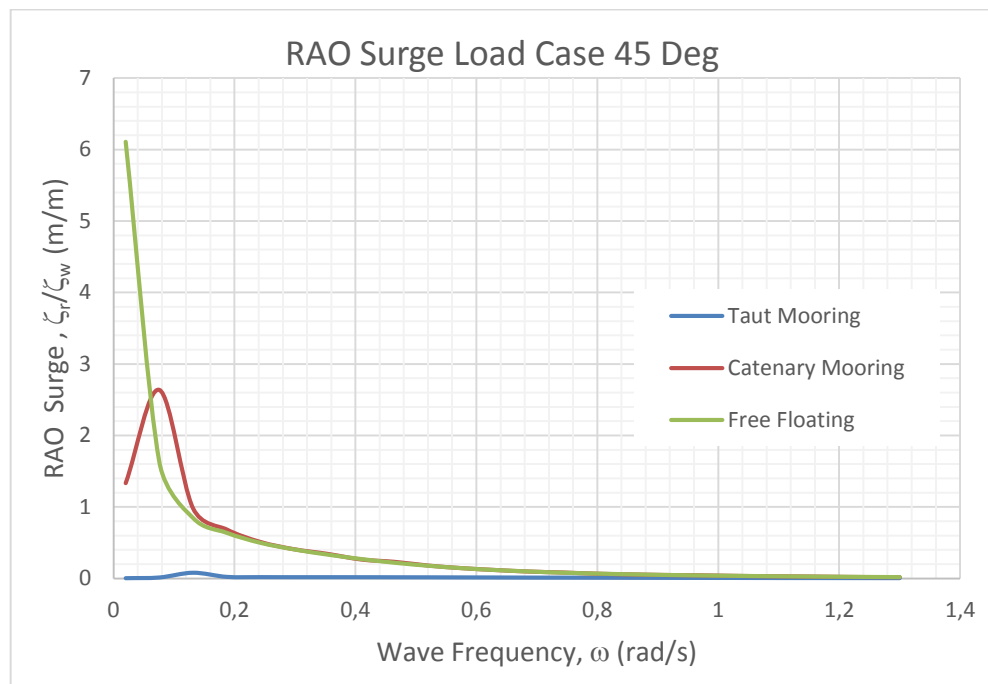
Dari hasil tabel diatas menunjukkan bahwa struktur yang diteliti memenuhi kriteria standarisasi dan valid sehingga dapat dilakukan analisa lebih lanjut.

4.1.4 Analisa Respon Gerak Struktur dengan Variasi Sistem Tambat

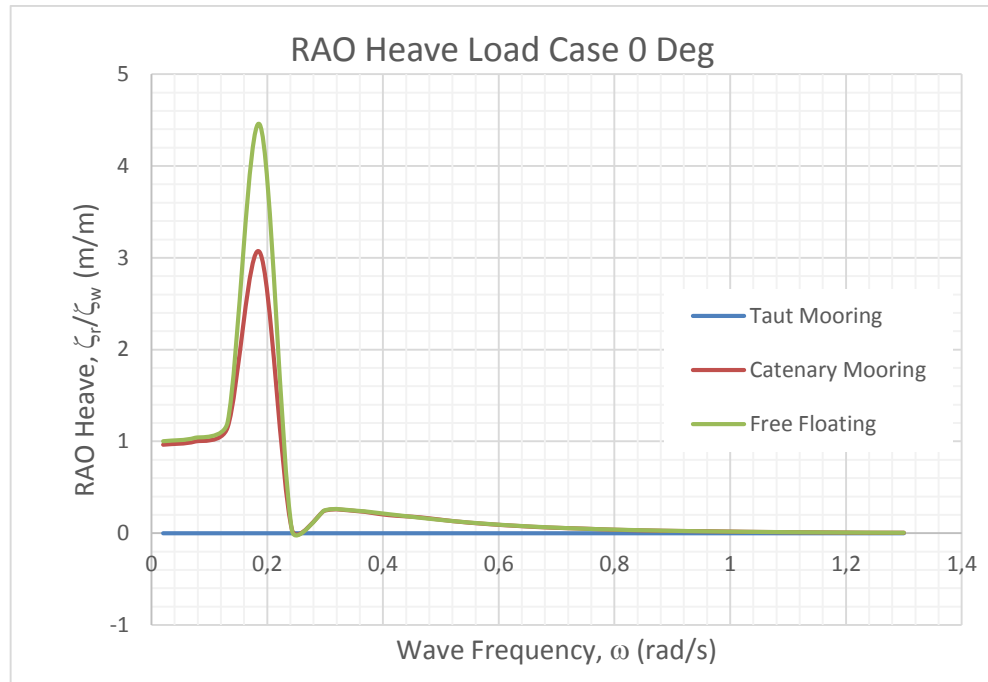
Pada bagian ini akan dibahas perubahan perilaku gerakan struktur ketika ditambat secara *taut* dan secara *catenary*. Pada analisa ini *mode* gerakan yang ditinjau adalah gerakan *surge*, *heave*, dan *roll* dan arah pembebanan yang diberikan adalah 0° dan 45°. Hal ini karena nilai RAO *free floating* pada *surge/roll* 0° dan *sway/pitch* 90° memiliki nilai yang sama. Sedangkan gerak *yaw* diabaikan karena gerakan yang terjadi sangat kecil mendekati nol akibat struktur yang simetris. Respon gerak struktur tertambat ditunjukkan dalam bentuk kurva RAO Berikut ini :



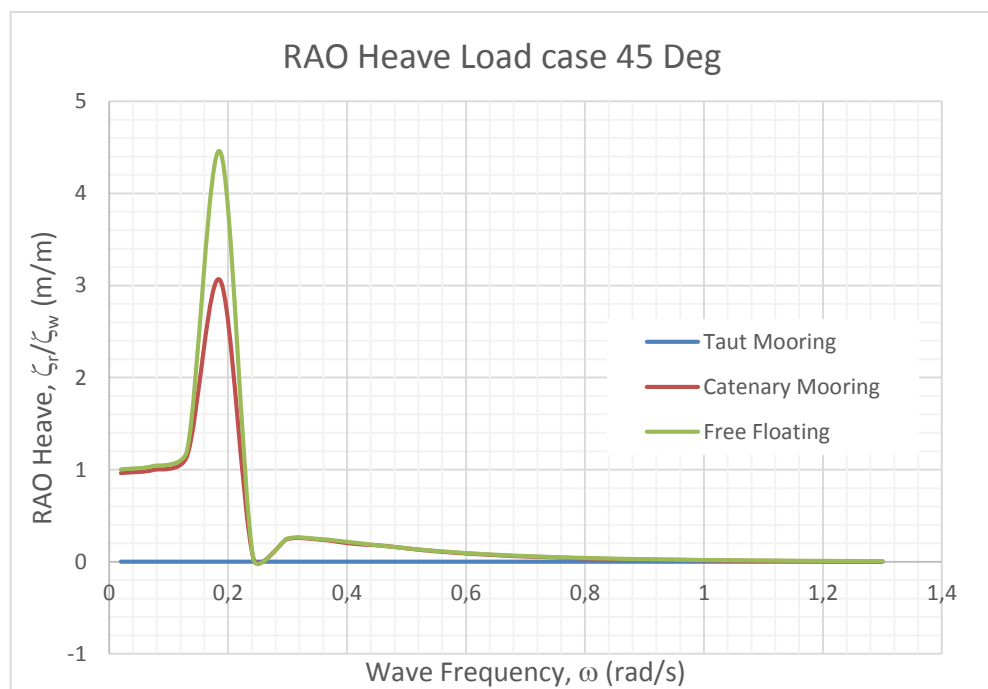
Gambar 4. 10 Grafik RAO Gerak *Surge* dengan *load case* 0°



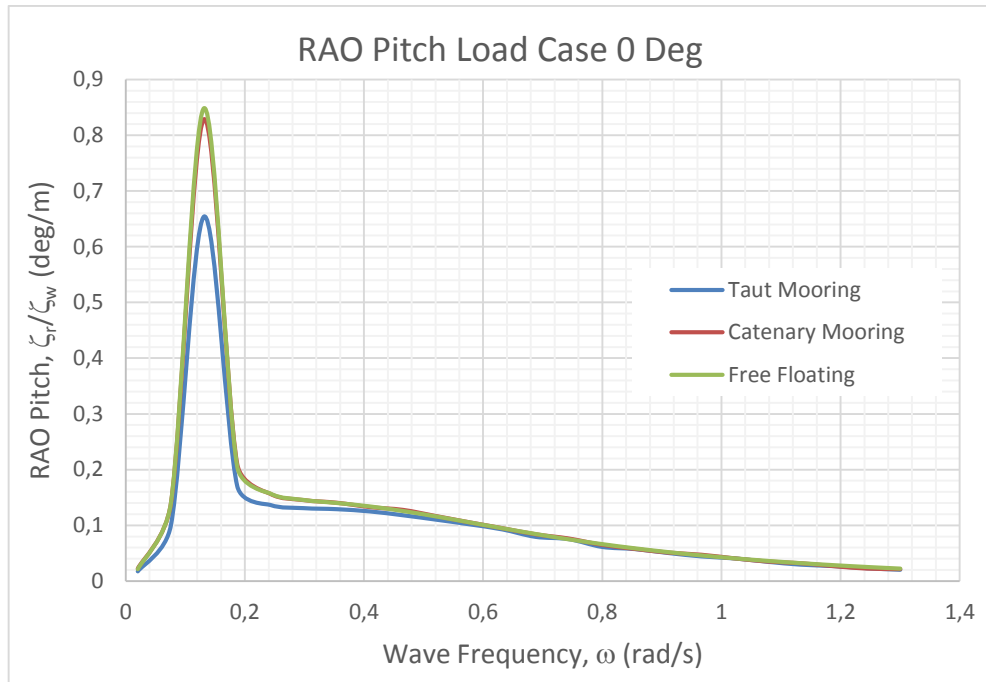
Gambar 4. 11 Grafik RAO Gerak *Surge* dengan *load case* 45°



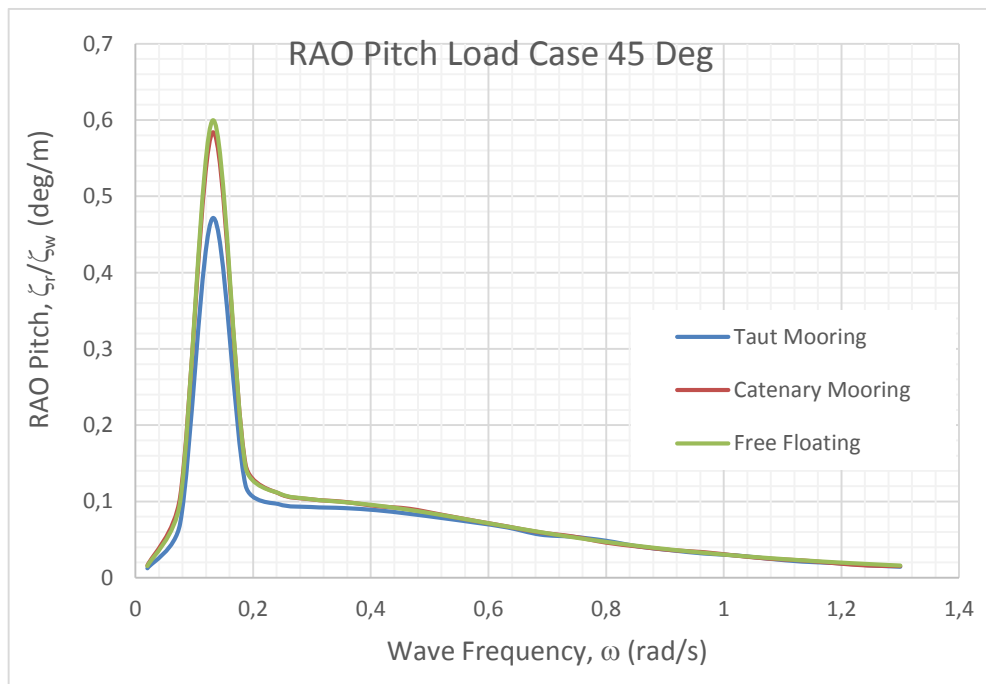
Gambar 4. 12 Grafik RAO Gerak *Heave* dengan *load case* 0°



Gambar 4. 13 Grafik RAO Gerak *Heave* dengan *load case* 45°



Gambar 4. 14 Grafik RAO Gerak *Pitch* dengan *load case* 0°



Gambar 4. 15 Grafik RAO Gerak *Pitch* dengan *load case* 45°

Dari sajian grafik diatas menunjukan bahwa terjadi penurunan amplitudo gerakan struktur akibat pengaruh sistem tambat. Pengaruh sistem tambat pada

gerakan *surge* dan *heave* mengakibatkan perubahan RAO yang signifikan. Pengaruh sistem tambat *catenary* pada *mode* gerakan *pitch* untuk semua arah pembebanan tidak cukup signifikan. Sedangkan sistem tambat *taut* cukup signifikan mereduksi gerakan struktur.

Tabel 4. 3 Nilai RAO Maksimum dengan arah pembebanan 0°

Mode Gerakan	Unit	RAO		
		Free Floating	Taut Mooring	Catenary Mooring
Surge	m/m	8.63856	0.11263	3.97860
Heave	m/m	4.45186	0.00035	3.97860
Pitch	deg/m	0.84842	0.65421	0.82864

Tabel 4. 4 Nilai RAO Maksimum dengan arah pembebanan 45°

Mode Gerakan	Unit	RAO		
		Free Floating	Taut Mooring	Catenary Mooring
Surge	m/m	6.10838	0.08118	2.63713
Heave	m/m	4.45187	0.00035	3.05559
Pitch	deg/m	0.59992	0.47150	0.58383

Tabulasi nilai diatas menunjukkan bahwa sistem tambat *taut* mampu mereduksi gerakan struktur pada semua *mode* gerakan dan arah *load case*. Pada semua mode gerakan sistem tambat *taut* mampu mereduksi gerakan struktur rata-rata 73.86% sedangkan sistem tambat *catenary* mampu mereduksi gerakan struktur rata-rata sebesar 22.30 %.

4.1.5 Analisa Stabilitas Struktur

Kriterias stabilitas pada turbin angin agar dapat bekerja dengan baik dapat dilihat dari besarnya *pitch* pada struktur. Besarnya perpindahan rotasional *pitch* pada konfigurasi struktur FWT Sarat 120 M kondisi *free floating* adalah sebesar 0.22° . Merujuk pada pengelompokan Rich Mercier nilai $0.22^\circ \leq 0.7^\circ$, sehingga struktur tersebut mempunyai kategori stabilitas *operating* dan tidak terjadi *overtuning*.

4.2 Simulasi Sarat Air dan Sistem Tambat

Ada beberapa variasi yang diberikan pada simulasi ini yakni variasi sistem tambat dan variasi tinggi sarat air. Sarat air yang ditinjau adalah $T = 120$ m dan $T = 130$ m. Sedangkan sistem tambatnya sama dengan simulasi pertama. Arah pembebanan yang diberikan pada simulasi ini adalah 0° , 45° . Adapun *mode* gerakan difokuskan pada gerak *surge*, *heave*, dan *pitch*.

4.2.1 Pemodelan Struktur *Floating Wind Turbine*

Struktur FWT yang dimodelkan adalah FWT sarat 120 m yang diambil pada model simulasi pertama. Sedangkan FWT sarat 130 m dimodelkan dengan menambahkan massa secara merata pada *floating structure*. Massa *Floating Wind Turbine* Sarat 130 M adalah sebesar 115 % dari massa FWT Sarat 120 m. Penambahan massa tersebut mengakibatkan perubahan sarat air, *volume displacemet*, tinggi *Gravity to Metacentre*, letak *Centre Of Gravity* dan *Centre Of Bouyancy*.

Tabel 4. 5 Perbandingan Hasil Pemodelan Struktur FWT Sarat 130 M

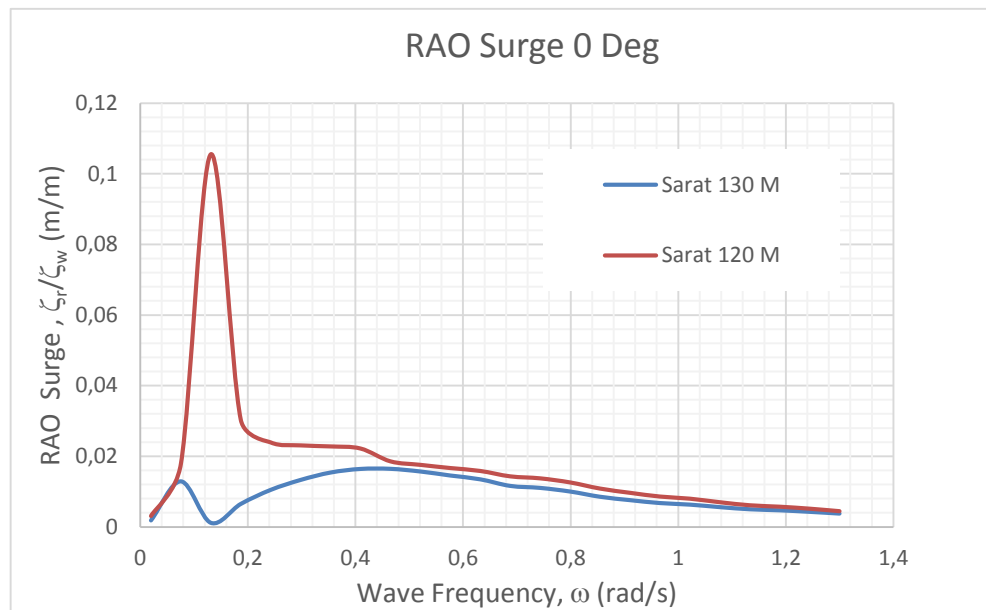
	Unit	Hitungan	Ansys	koreksi
GM	m	7.989	7.908	1.01%
CoB	m	-69.404	-69.485	-0.12%
CoG	m	-77.382	-77.382	0.00%
Volume Displacement	m ³	8361.04	8279.366	0.98%

4.2.2 Analisa Respon Gerak Struktur

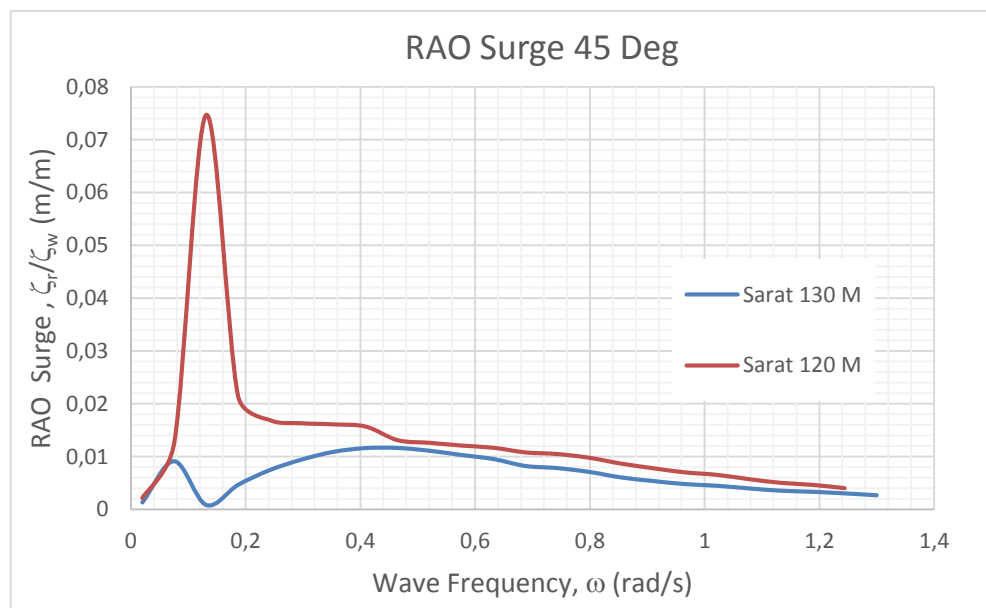
Pada sub-bab akan dibahas perubahan gerakan struktur akibat perubahan sarat air pada setiap sistem tambat. Hasil analisa disajikan dalam bentuk yang sama seperti analisa respon gerak sebelumnya yakni dalam bentuk grafik *Response Amplitude Operator*. Berikut ini adalah hasil analisisnya :

4.2.2.1 Respon Gerak Struktur Pengaruh Sistem Tambat *Taut*

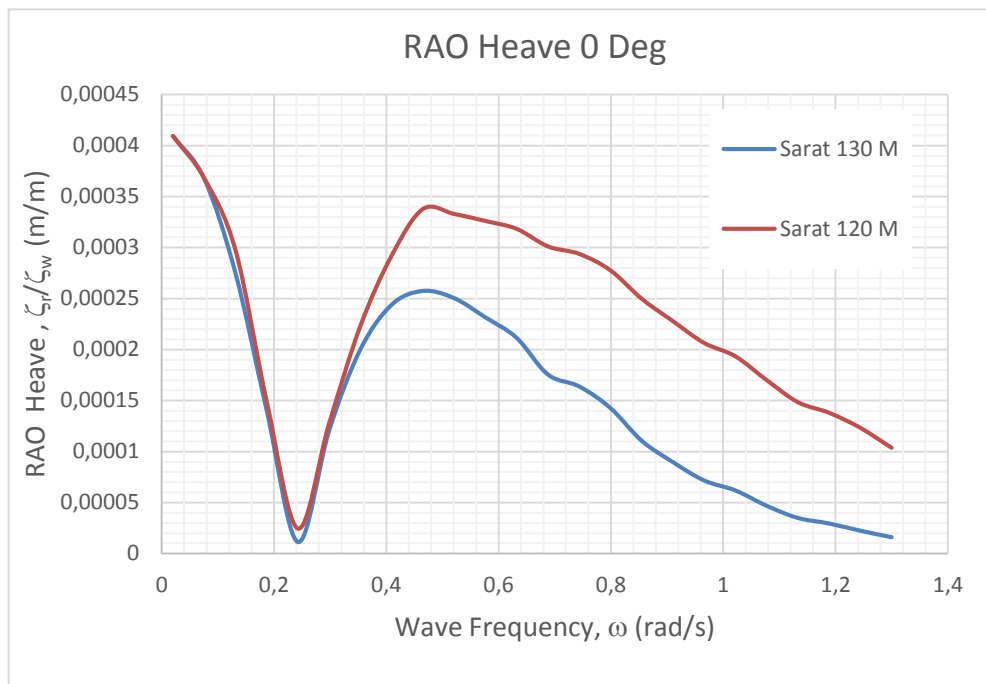
Pada bagian ini analisa dilakukan dengan membandingkan RAO model Strukt FWT Sarat 120 M dan model FWT Sarat 130 M yang keduanya ditambat secara *taut*. Dibawah ini akan disajikan kurva *Respon Amplitude Operator* :



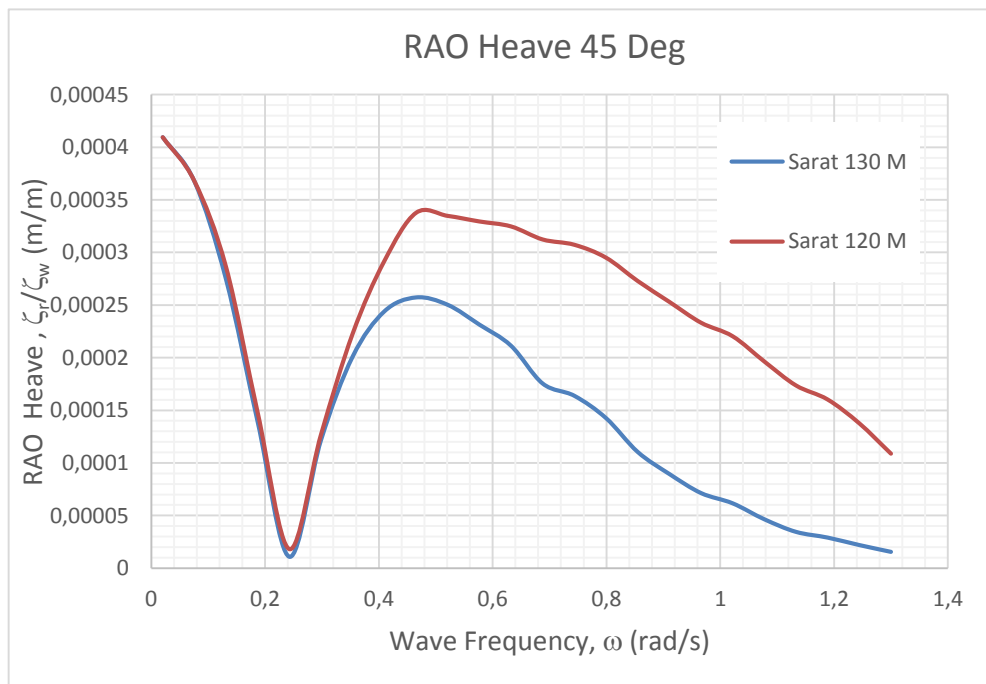
Gambar 4. 16 Grafik RAO Gerak surge dengan load case 0°



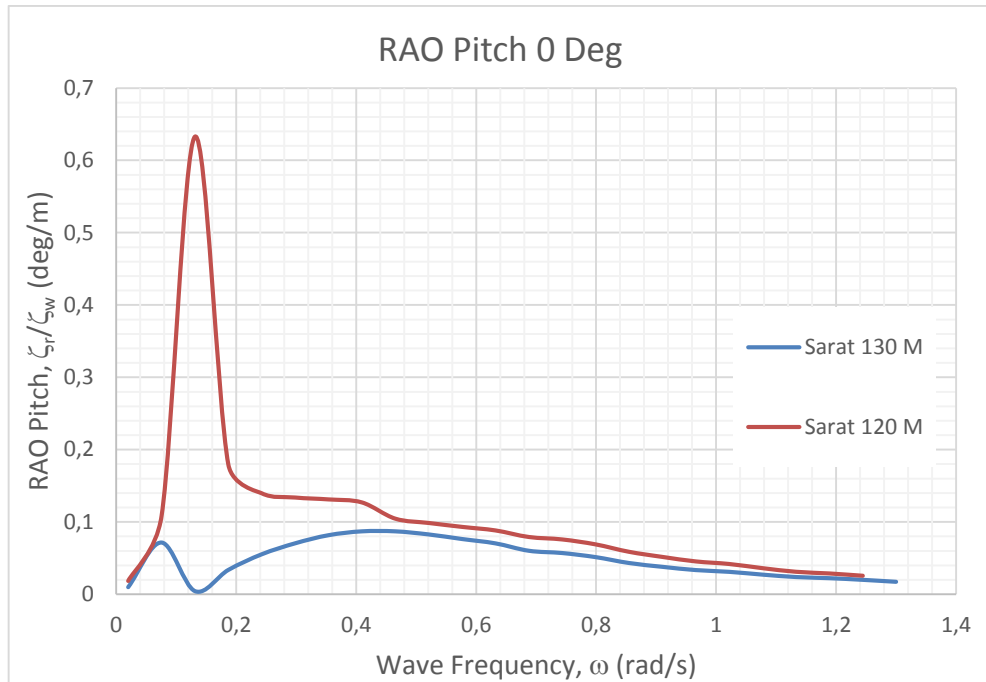
Gambar 4. 17 Grafik RAO Gerak Surge dengan load case 45°



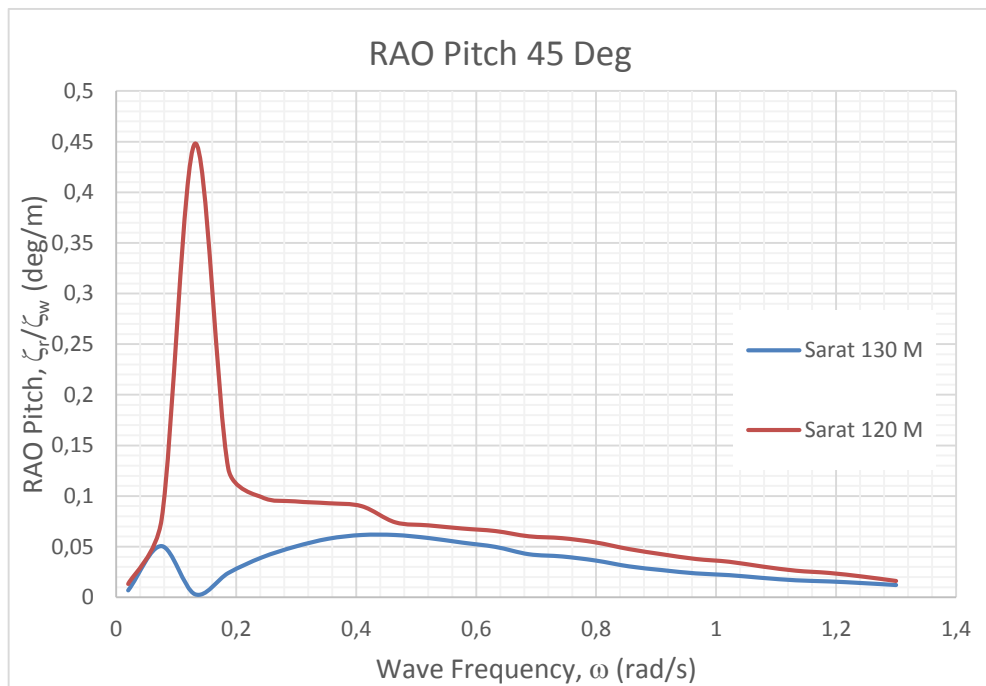
Gambar 4. 18 Grafik RAO Gerak *heave* dengan *load case* 0°



Gambar 4. 19 Grafik RAO Gerak *Heave* dengan *load case* 45°



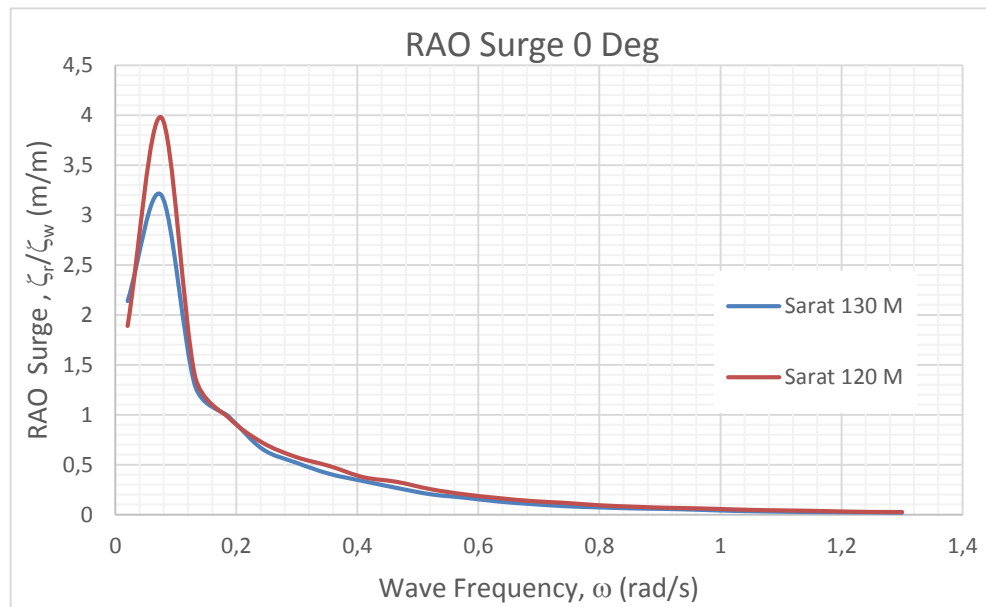
Gambar 4. 20 Grafik RAO Gerak *Pitch* dengan *load case* 0°



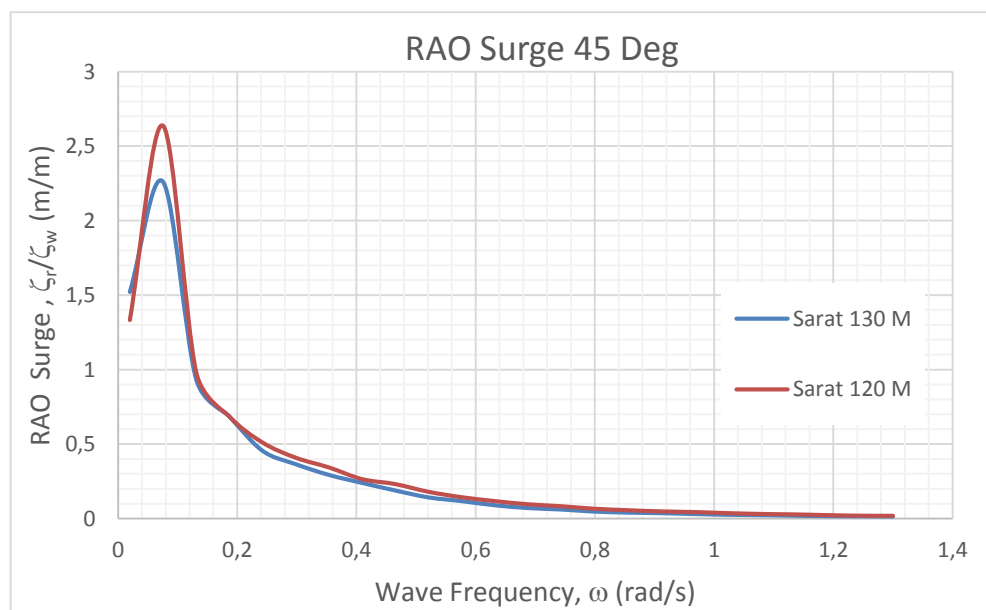
Gambar 4. 21 Grafik RAO Gerak *Pitch* dengan *load case* 45°

Hasil *Respon Amplitude Operator* menunjukkan bahwa model struktur FWT Sarat 130 M cukup signifikan mereduksi amplitudo gerakan struktur terutama terjadi pada *mode* gerakan *surge* dan *pitch*.

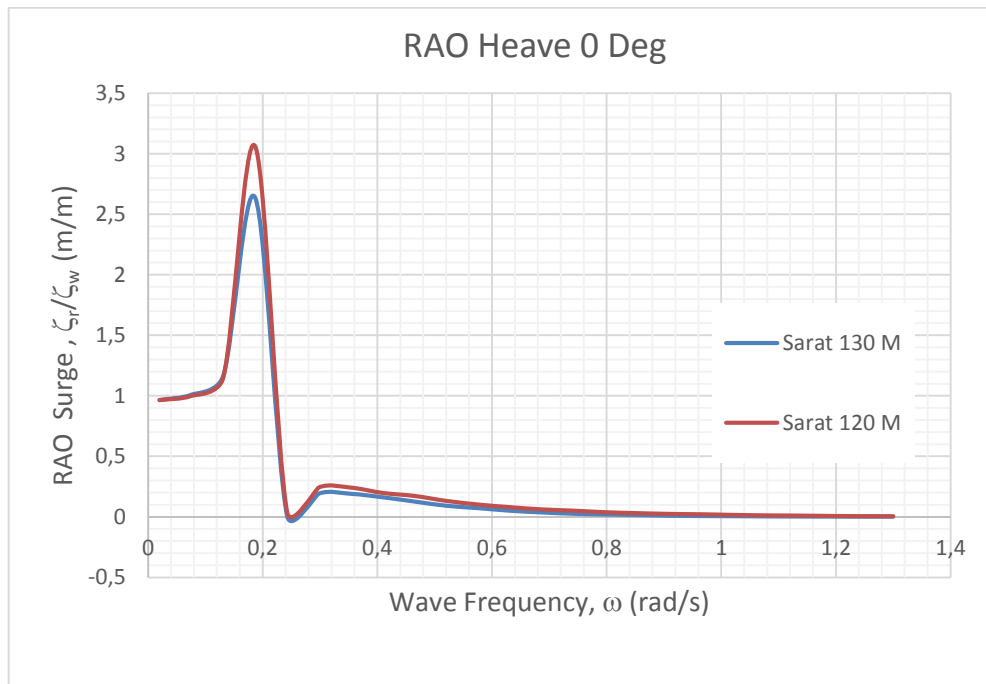
4.2.2.2 Respon Gerak Struktur Pengaruh Sistem Tambat *Catenary*



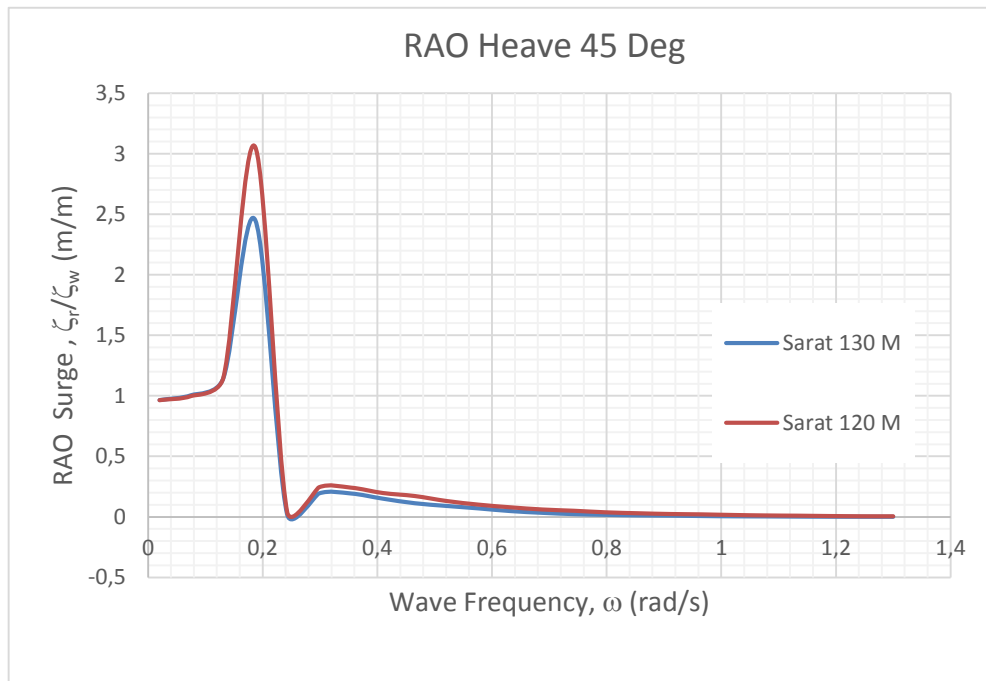
Gambar 4. 22 Grafik RAO Gerak *Surge* dengan *load case* 0°



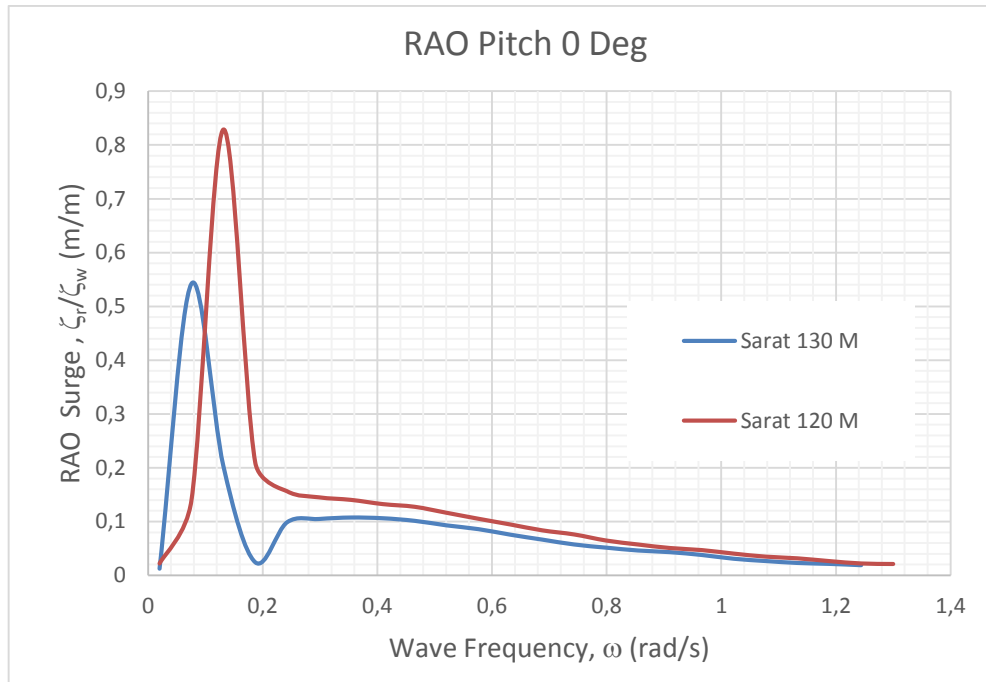
Gambar 4. 23 Grafik RAO Gerak *Surge* dengan *load case* 45°



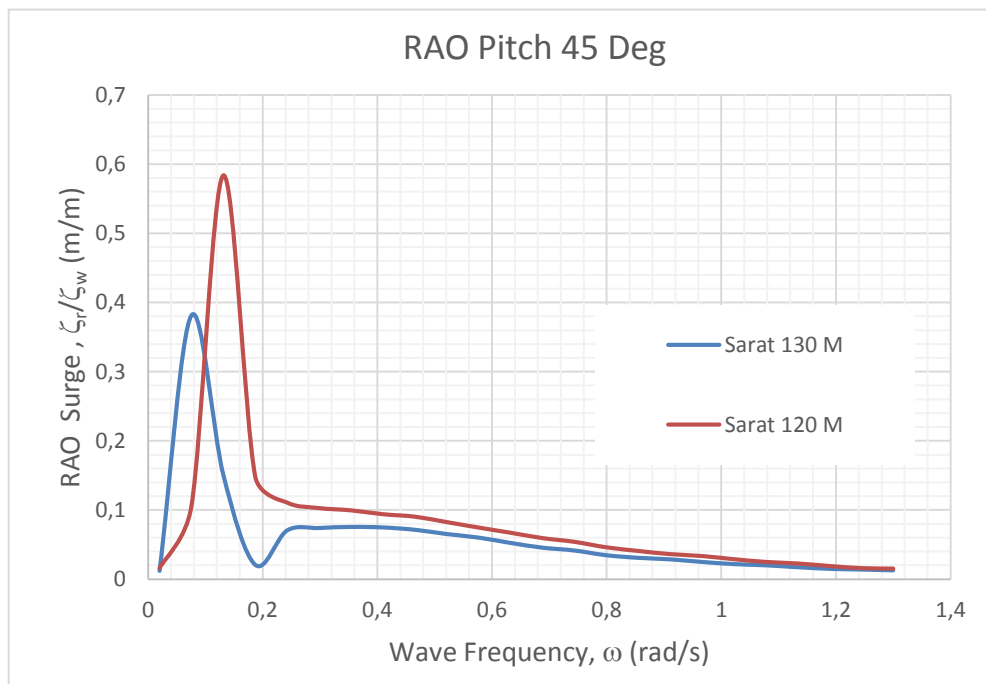
Gambar 4. 24 Grafik RAO Gerak *Heave* dengan *load case* 0°



Gambar 4. 25 Grafik RAO Gerak *Heave* dengan *load case* 45°



Gambar 4. 26 Grafik RAO Gerak *Pitch* dengan *load case* 0°



Gambar 4. 27 Grafik RAO Gerak *Pitch* dengan *load case* 45°

Seperti pada konfigurasi dengan sistem tambat *taut*, amplitudo untuk gerakan *surge*, *heave*, dan *pitch* akan tereduksi seiring dengan penambahan tinggi sarat air.

Perubahan besar nilai RAO akibat variasi sarat air juga mempengaruhi perubahan amplitudo *mode* gerakan pada semua arah pembebanan.

Berikut ini adalah tabulasi nilai RAO maksimum untuk semua konfigurasi struktur pada semua mode gerakan yang ditinjau dan arah pembebanan yang diberikan.

Tabel 4. 6 Perbandingan Nilai RAO Maksimum pada Setiap Sarat

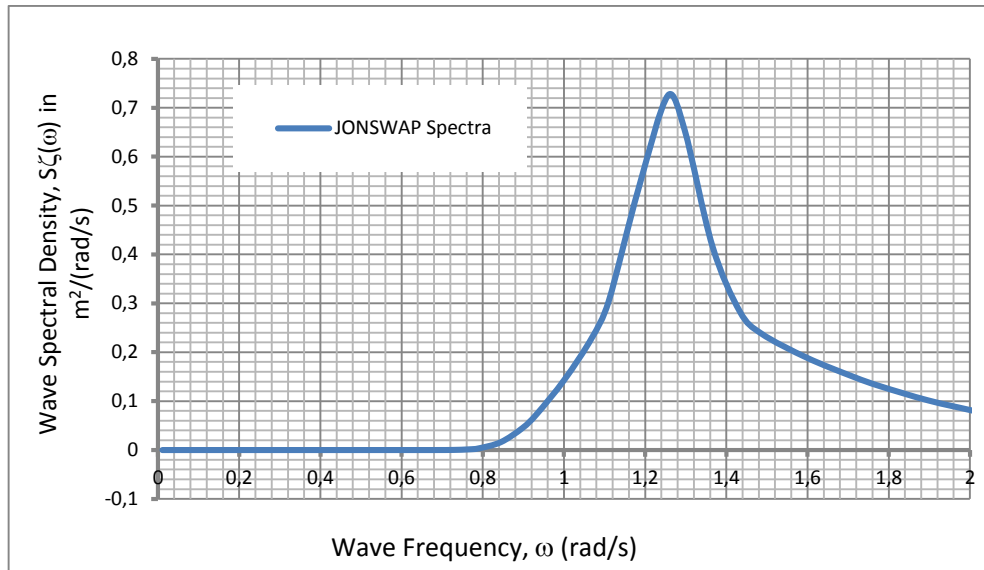
	Mode Gerakan	0°		45°	
		FWT Sarat 120 M	FWT Sarat 130 M	FWT Sarat 120 M	FWT Sarat 130 M
<i>Taut</i>	<i>Surge</i>	0.1126	0.0164	0.0812	0.0116
	<i>Heave</i>	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
	<i>Pitch</i>	0.6542	0.0870	0.4715	0.0615
<i>Catenary</i>	<i>Surge</i>	3.9786	3.2003	2.6371	2.2604
	<i>Heave</i>	3.0604	2.6356	3.0556	2.4509
	<i>Pitch</i>	0.8286	0.5421	0.5838	0.3814

Berdasarkan tabel diatas menunjukkan bahwa konfigurasi struktur FWT 130 M memiliki nilai RAO lebih kecil dibandingkan struktur FWT 120 M. Hal ini terjadi pada semua *mode* gerakan dan arah pembebanan. Perbedaan nilai RAO terbesar terjadi pada *mode* gerakan *Pitch*.

4.3 Respon Gerakan pada Gelombang Irreguler

4.3.1 Spektrum Gelombang

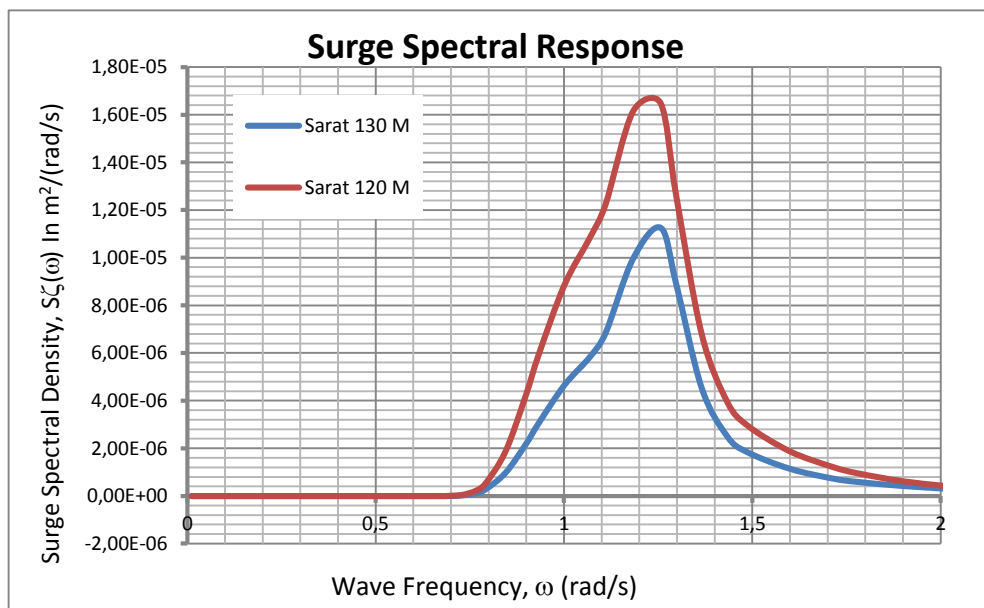
Dalam menentukan karakteristik perilaku gerakan struktur terapung pada gelombang acak atau *irregular* maka diperlukan spektrum gelombang untuk mewakili kondisi ril struktur beroperasi. Pemilihan spektrum gelombang untuk analisa respon gerak struktur *Floating Wind Turbine* pada gelombang *irregular* didasarkan pada kondisi ril laut yang ditinjau. Spektra gelombang yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah Spektra Jonswap. Berikut ini adalah grafik spektra gelombang pada Selat Makassar dengan parameter $H_s = 2.351$; $T_p = 5,0$; dan $\gamma = 2,5$:



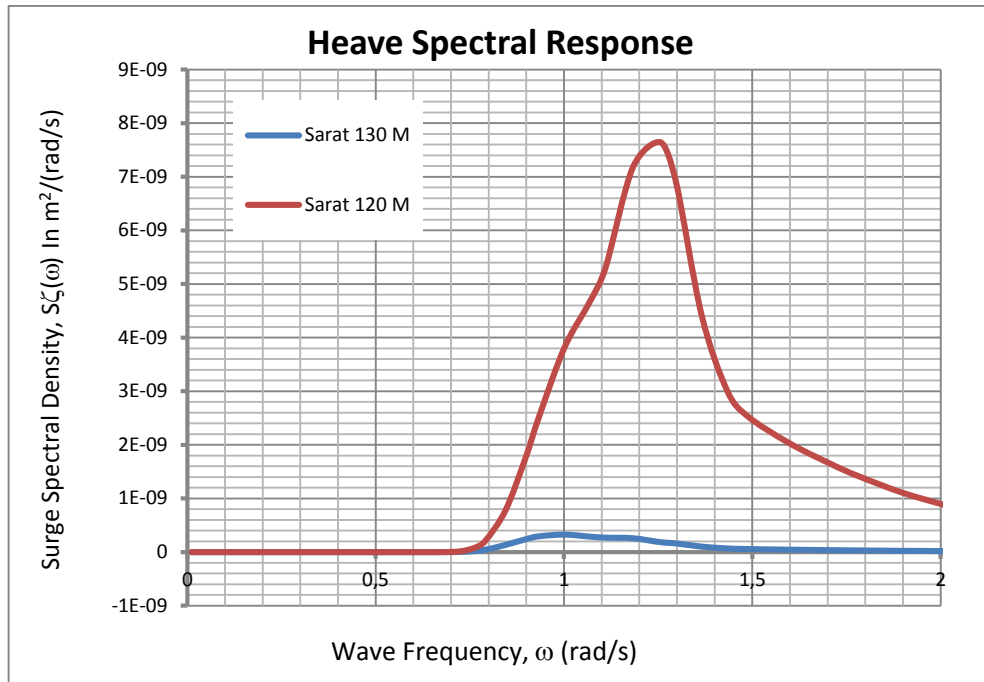
Gambar 4. 28 Grafik Spektra Jonswap

4.3.2 Analisa Respon Spektra

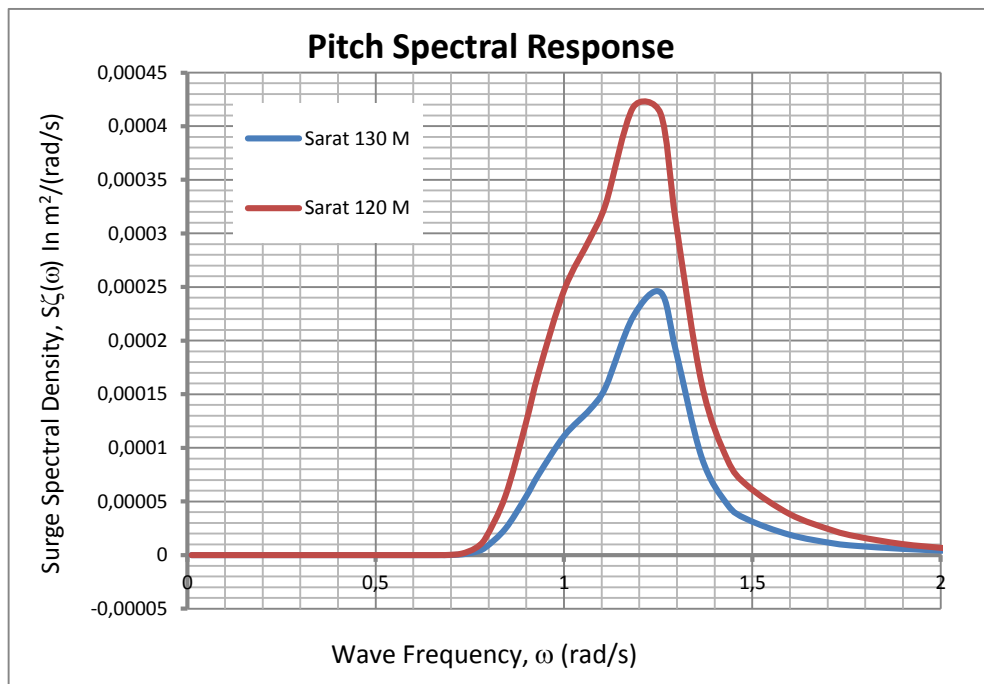
Response Amplitudo Operator (RAO) yang digunakan dalam analisa ini adalah RAO pada arah pembebanan gelombang yang menghasilkan nilai paling besar, yaitu arah pembebanan 0° . Nilai *Response Spectra* didapatkan dengan cara mengalikan harga spektra gelombang dengan nilai RAO kuadrat-nya. Berikut ini akan disajikan grafik *response spectra* pada masing masing sistem tambat dan variasi tinggi sarat air.



Gambar 4. 29 Grafik Respon Spektra Gerakan *Surge* dengan Sistem Tambat *Taut*



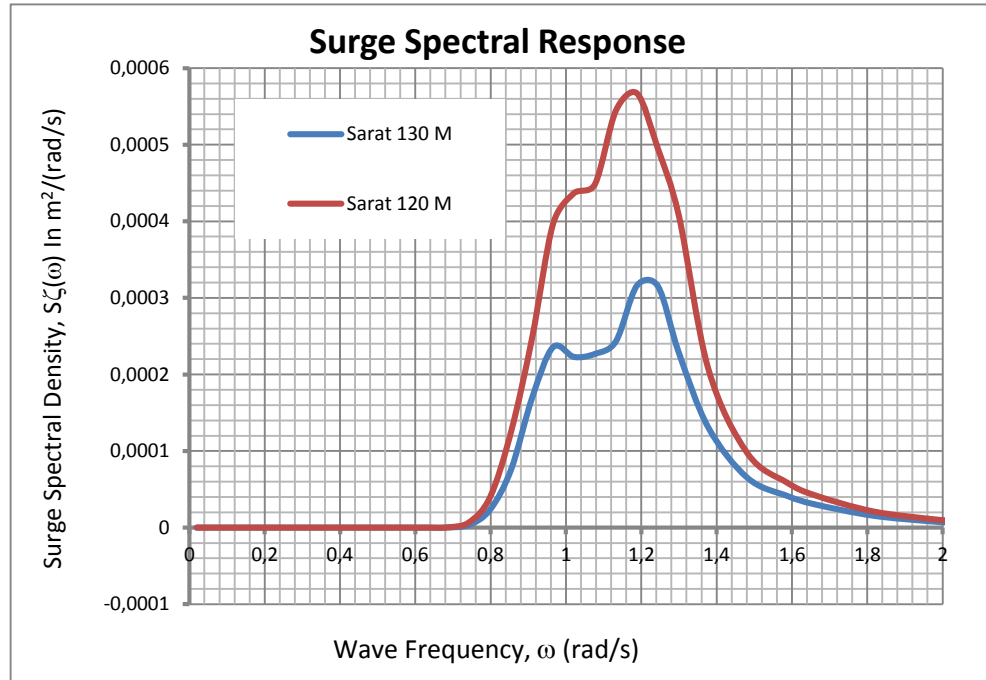
Gambar 4. 30 Grafik Respon Spektra Gerakan *Heave* dengan Sistem Tambat *Taut*



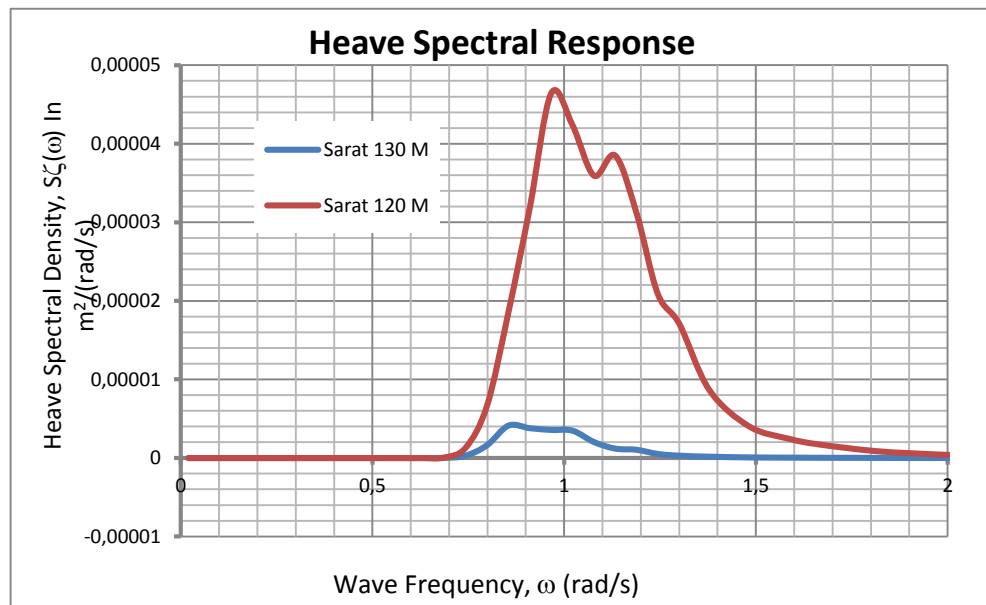
Gambar 4. 31 Grafik Respon Spektra Gerakan *Pitch* dengan Sistem Tambat *Taut*

Nilai respon spektra maksimum untuk konfigurasi struktur FWT Sarat 120 M dengan sistem tambat *taut* terjadi pada mode gerakan *pitch* sebesar 0.000417327 in $\text{m}^2/(\text{rad/s})$. Begitu juga dengan nilai *respon spectra* maksimum untuk konfigurasi

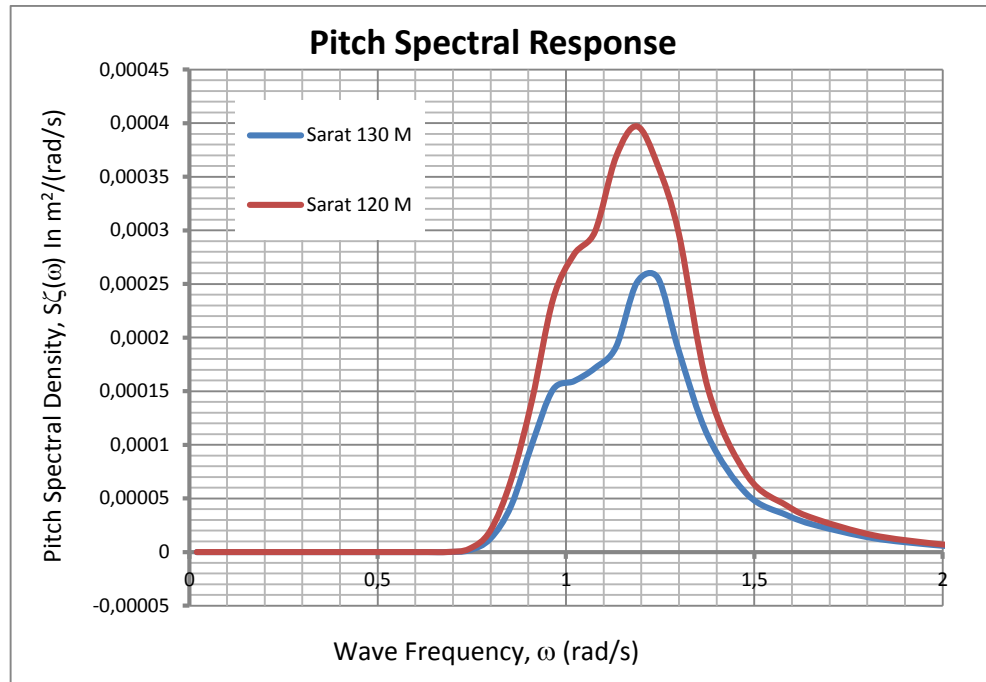
struktur FWT Sarat 130 M dengan sistem tambat *taut* juga terjadi pada *mode* gerakan *pitch* dengan nilai sebesar 0.000245155 in $\text{m}^2/(\text{rad/s})$.



Gambar 4. 32 Grafik Respon Spektra Gerakan *Surge* dengan Sistem Tambat *Catenary*



Gambar 4. 33 Grafik Respon Spektra Gerakan *Heave* dengan Sistem Tambat *Catenary*



Gambar 4. 34 Grafik Respon Spektra Gerakan *Pitch* dengan Sistem Tambat *Catenary*

Dari grafik *response spectra* diatas dapat diketahui bahwa besar nilai *response spectra* maksimum pada semua *mode* gerakan untuk konfigurasi FWT sarat 120 M dan FWT 130 dengan sistem tambat *catenary* terjadi pada mode gerakan *surge* yakni masing-masing sebesar 0.000567305 in $\text{m}^2/(\text{rad/s})$ dan 0.000316064 in $\text{m}^2/(\text{rad/s})$.

Berdasarkan grafik menunjukkan bahwa *Floating Wind Turbine* Sarat 130 M memiliki respon spektra yang lebih kecil dibanding FWT Sarat 120 M. Hal ini terjadi pada semua *mode* gerakan yang ditinjau dan sistem tambat yang divariasikan. Nilai respon spektra maksimum struktur *Floating Wind Turbine* untuk setiap *mode* gerakan, variasi sarat dan sistem tambat disajikan dalam bentuk tabel berikut ini :

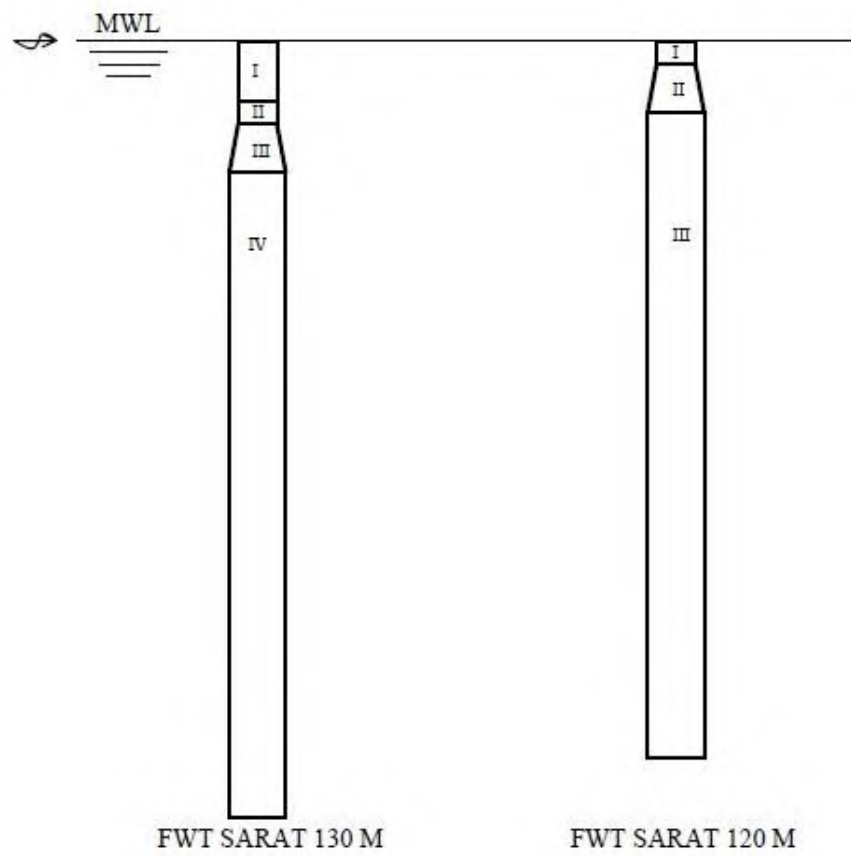
Tabel 4. 7 Nilai Maksimum *Response Spectra*

	Moda Gerakan	Nilai Maksimum Respon Gerakan (in m ² /(rad/s))	
		FWT Sarat 120 M	FWT Sarat 130 M
<i>Taut</i>	<i>Surge</i>	1.64801E-05	1.12595E-05
	<i>Heave</i>	9.49588E-09	3.54359E-10
	<i>Pitch</i>	0.000417327	0.000245155
<i>Catenary</i>	<i>Surge</i>	0.000567305	0.000316064
	<i>Heave</i>	4.64318E-05	0.000255663
	<i>Pitch</i>	0.00039712	4.11656E-06

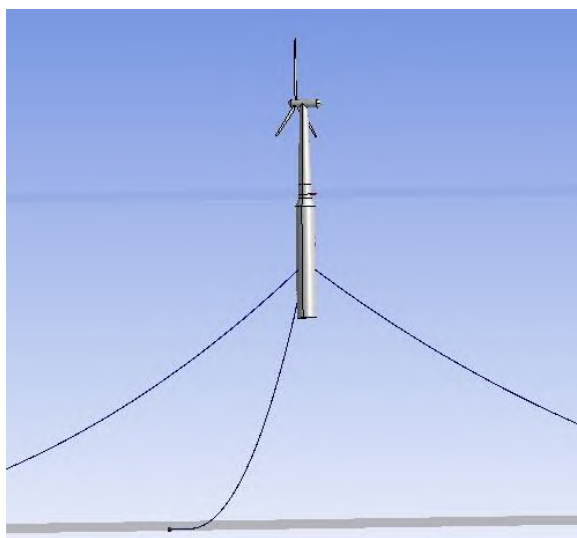
Dari tabel diatas dapat diketahui bahwa respon spektra terbesar pada semua variasi terjadi pada mode gerakan *surge* dengan model struktur FWT Sarat 120 M dan menggunakan sistem tambat *catenary* yakni sebesar 0.000567305 in m²/(rad/s). Sedangkan Nilai Respon Spektra maksimum untuk model struktur yang menggunakan sistem tambat *taut* terjadi pada mode gerakan *pitch* sebesar 0.000417327 in m²/(rad/s) dengan model struktur FWT Sarat 120 M.

LAMPIRAN A
MODEL KONFIGURASI STRUKTUR

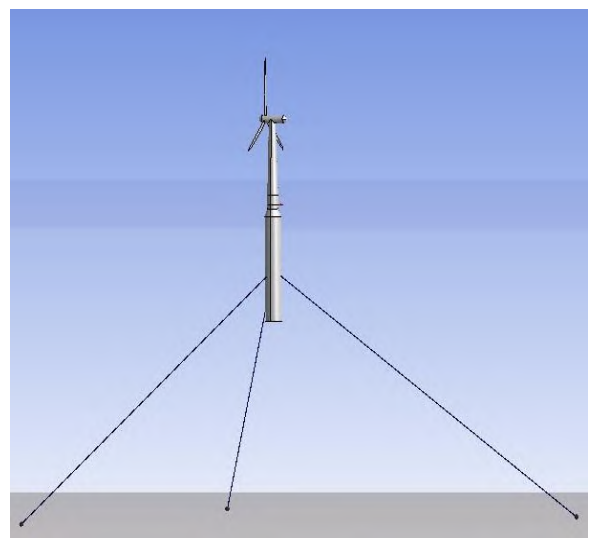
A. Gambar Model *Floating Structure*



B. Gambar Model Konfigurasi Sistem Tambat



Gambar *Catenary Mooring*



Gambar *Taut Mooring*

LAMPIRAN B
PERHITUNGAN TINGGI GELOMBANG

<i>All Years</i>		<i>Sea Wave Directions</i>									Jumlah	Kumulatif
Hs	Tp	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	ALL SEA		
0.15	3.05	0.19	0.6	0.41	0.34	0.33	0.38	0.22	0.07	2.54	5.08	5.08
0.15-0.30	3.35	1.55	5.27	3.83	3.47	4.61	5.6	2.02	0.9	27.25	54.5	59.58
0.30-0.45	3.73	2.04	5.19	2.72	1.68	3.21	4.38	0.97	0.57	20.76	41.52	101.1
0.45-0.60	3.93	2.23	4.28	1.96	0.7	1.68	2.44	0.4	0.35	14.04	28.08	129.18
0.60-0.75	4.24	2.36	4.17	1.69	0.29	0.53	0.79	0.18	0.14	10.15	20.3	149.48
0.75-0.90	4.58	2.15	3.47	1.35	0.11	0.13	0.19	0.08	0.06	7.54	15.08	164.56
0.90-1.05	4.77	1.96	2.9	1.19	0.05	0.02	0.02	0.03	0.02	6.19	12.38	176.94
1.05-1.20	4.9	0.98	1.39	0.59	0.01	0	0	0.01	0	2.98	5.96	182.9
1.20-1.35	5.38	0.62	0.84	0.38	0.01	0	0	0	0	1.85	3.7	186.6
1.35-1.50	5.56	0.13	0.18	0.08	0	0	0	0	0	0.39	0.78	187.38
1.50-1.65	6.05	0.05	0.06	0.03	0.01	0.01	0.01	0	0	0.17	0.34	187.72
1.65-1.80	6.35	0.02	0.04	0.01	0	0	0	0	0	0.07	0.14	187.86
1.80-1.95		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	187.86
		14.28	28.39	14.24	6.67	10.52	13.81	3.91	2.11	93.93	187.86	188.36

X		Y	
Hs	P(Hs)	ln(Hs-a)	ln(ln1/(1-P(Hs)))
0.15	0.02697	-1.897119985	-3.599404915
0.3	0.316309	-1.203972804	-0.966927654
0.45	0.536738	-0.798507696	-0.262062595
0.6	0.685814	-0.510825624	0.146496932
0.75	0.793587	-0.287682072	0.456079034
0.9	0.873646	-0.105360516	0.72690562
1.05	0.939371	0.048790164	1.030686284
1.2	0.971013	0.182321557	1.264382693
1.35	0.990656	0.300104592	1.541810084
1.5	0.994797	0.405465108	1.659856794
1.65	0.996602	0.500775288	1.737768175
1.8	0.997346	0.587786665	1.780277504
1.95	0.997346	0.667829373	1.780277504
Jumlah		-2.11039595	7.29614546
Rata-rata		-0.16233815	0.561241958

X.Y	X^2
6.828503	3.599064
1.164155	1.449551
0.209259	0.637615
-0.07483	0.260943
-0.13121	0.082761
-0.07659	0.011101
0.050287	0.00238
0.230524	0.033241
0.462704	0.090063
0.673014	0.164402
0.870231	0.250776
1.046423	0.345493
1.188922	0.445996
12.4414	7.373385

Rumus Persamaan Regresi

$$Y = a + bX$$

a	b
0.876	1.938

Maka, Persamaanya regresinya adalah :

$$Y = 0.876 + 1.938X$$

LAMPIRAN C-1
PERHITUNGAN COG, COB, JARI – JARI GIRASI, DAN TINGGI
METASENTRA FWT SARAT 120 METER

Tabel Perhitungan CoG Sarat 120 Meter

Sarat = 120 m

Struktur	Massa (kg)	<i>Central of massa</i>			<i>Product</i>			<i>Centre of Gravity Hitungan</i>		
		x	Y	z	x.m	y.m	z.m	x	y	z
<i>Freeboard</i>	696900	-0.13	0	64.21	-93385	0	4E+07	-0.01	0	-76.76
<i>Submerged</i>	7466330	0	0	-89.92	-	0	-7E+08			
Total	8163230				-93385	0	-6E+08			

CoG	Hitungan	Data
x	-0.011	- 0.01
y	0	-
z	-76.758	-77.7

Titik Acuan (origin) :

x	=	0	CL
y	=	0	CL
z	=	0	MSL

Tabel Perhitungan CoB

Struktur *	Volume (m^3)	<i>Central of Volume</i>			<i>Product</i>			<i>Centre of Bouyancy hitungan</i>		
		x	y	z	x.m	y.m	z.m	x	y	z
I	132.732	0	0	-2	0	0	-265.5	0	0	-62.066
II	401.517	0	0	-8.481	0	0	-3405	<i>Centre Of Bouyancy ANSYS</i>		
III	7494.960	0	0	-66	0	0	-5E+05			
	8029.21				0	0	-5E+05			

*Bentuk struktur dapat dilihat pada lampiran A

Perhitungan Jari- jari Girasi

Struktur	Massa	<i>Momen of Inertia (kg/m^2)</i>			Jari-jari girasi		
	(kg)	I ₄₄	I ₅₅	I ₆₆	R ₄₄	R ₅₅	R ₆₆
FWT	8163230	6.8234E+10	68221000000	187870000	91.43	91.42	4.80

$$I_{ii} = M \cdot R_{ii}^2$$

Ket : i = 4,5,6

Perhitungan Tinggi Metasentra FWT Sarat 120 Meter

$$GM = KM - KG \quad \text{Tinggi Gravity to Metacentre} \quad (\text{m})$$

$$GM = KB + BM - KG$$

$$BM = \frac{I_{xx}}{\nabla} \quad \text{Tinggi Bouancy to Metacentre} \quad (\text{m})$$

$$I_{xx} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot R^4 \quad \text{Momen Inertia Bidang lingkaran} \quad (\text{m}^4)$$

$$\nabla = 8029.21 \quad \text{Volume Displacement} \quad (\text{m}^3)$$

$$R = 3.25 \quad \text{Jari-jari lingkaran} \quad \text{m}$$

$$KG = 43.242 \quad \text{Jarak Keel to Gravity} \quad \text{m}$$

$$KB = 57.93 \quad \text{Jarak Keel to Bouancy} \quad \text{m}$$

Penyelesaian :

Momen Inersia Bidang

$$I_{xx} = \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 3,25^4$$

$$I_{xx} = 87.62 \quad (\text{m}^4)$$

Tinggi Bouancy to Metacentre

$$BM = \frac{I_{xx}}{\nabla} = \frac{87.62405057}{8029.21} = 0.0109 \quad \text{m}$$

Tinggi Gravity to Metacentre

$$GM = KB + BM - KG$$

$$GM = 57.93 + 0.0109 - 43.242$$

$$= 14.703 \quad \text{m} \quad \text{Stabil}$$

LAMPIRAN C-2
PERHITUNGAN COG, COB, JARI – JARI GIRASI,
DAN TINGGI METASENTRA FWT SARAT 130 METER

Perhitungan Tinggi Metasentra FWT Sarat 130 Meter

$$GM = KM - KG \quad \text{Tinggi Gravity to Metacentre} \quad (\text{m})$$

$$GM = KB + BM - KG$$

$$BM = \frac{I_{XX}}{\nabla} \quad \text{Tinggi Bouancy to Metacentre} \quad (\text{m})$$

$$I_{XX} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot R^4 \quad \text{Momen Inertia Bidang lingkaran} \quad (\text{m}^4)$$

$$\nabla = 8361.04 \quad \text{Volume Displacement} \quad (\text{m}^3)$$

$$R = 3.25 \quad \text{Jari-jari lingkaran} \quad \text{m}$$

$$KG = 52.618 \quad \text{Jarak Keel to Gravity} \quad \text{m}$$

$$KB = 60.5960306 \quad \text{Jarak Keel to Bouancy} \quad \text{m}$$

Penyelesaian :

Momen Inersia Bidang

$$I_{XX} = \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot 4.7^4$$

$$I_{XX} = 87.62 \quad (\text{m}^4)$$

Tinggi Bouancy to Metacentre

$$BM = \frac{I_{XX}}{\nabla} = \frac{87.62405057}{8361.04} = 0.01048 \quad \text{m}$$

Tinggi Gravity to Metacentre

$$GM = KB + BM - KG$$

$$GM = 60.596 + 0.0458 - 52.618$$

$$= 7.989 \quad \text{m} \quad \text{Stabil}$$

LAMPIRAN D-1
PERHITUNGAN FREKUENSI
DAN PERIODE NATURAL FWT SARAT 120M

Perhitungan Sarat 120 Meter

r	=	3.25	m	Jari-Jari Platform Atas (Permukaan Air)
R	=	4.7	m	Jari-jari Platform Bawah (di dalam air)
ρ	=	1025	kg/m	Massa Jenis air laut
g	=	9.81	m/s^2	Percepatan Gravitasi
GM_T	=	14.70297065	m	Tinggi Metasentra Melintang
GM_L	=	14.70297065	m	Tinggi Metasentra Memanjang
∇	=	8029.21	m^3	Volume
M_{33}	=	8,163,230.00	kg	Massa Struktur
I_{44}	=	68234000000	$kg.m^3$	Momen Inersia Massa Untuk Gerak <i>Roll</i>
I_{55}	=	68221000000	$kg.m^3$	Momen Inersia Massa Untuk Gerak <i>Pitch</i>
R_{44}	=	91.43	m	Jari-jari Girasi Gerak <i>Roll</i>
R_{55}	=	91.42	m	Jari-jari Girasi Gerak <i>Pitch</i>

Gerak *Heave*

$$\begin{aligned}k_{33} &= \rho \cdot g \cdot \pi \cdot r^2 && \text{Kekakuan } Heave \\&= 333,664.09 && \text{N/m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}a_{33} &= \frac{4}{3} \cdot \rho \cdot r^3 && \text{Massa Tambah Gerak } Heave \\&= 141,891.43 && \text{kg}\end{aligned}$$

$$\omega_{nz} = \sqrt{\frac{k_{33}}{M_{33} + a_{33}}} = 0.2004 \text{ rad/s} \quad \text{Frekuensi Natural Gerak } Heave$$

$$T = 31.34715477 \text{ s} \quad \text{Periode Natural } Heave$$

Gerak *Roll*

$$\begin{aligned}k_{44} &= \rho \cdot g \cdot \nabla \cdot GM_T && \text{Kekakuan } Roll \\&= 1187054831 \text{ N/m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}a_{44} &= a_{33} \cdot R_{44} && \text{Momen Inersia Massa Tambah Gerak } Roll \\&= 1186028087 \text{ kg}\end{aligned}$$

$$\omega_{n\theta} = \sqrt{\frac{k_{44}}{I_{44} + a_{44}}} = 0.131 \text{ rad/s} \quad \text{Frekuensi Natural Gerak } Roll$$

$$T = 48.04927852 \text{ s} \quad \text{Periode Natural Gerak } Roll$$

Gerak *Pitch*

$$\begin{aligned}k_{55} &= \rho \cdot g \cdot \nabla \cdot GM_L && \text{Kekakuan } Pitch \\&= 1187054831.28 \text{ N/m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}a_{55} &= a_{33} \cdot R_{55} && \text{Momen Inersia Massa Tambah Gerak } Pitch \\&= 12971320.79 \text{ kg}\end{aligned}$$

$$\omega_{n\theta} = \sqrt{\frac{k_{55}}{I_{55} + a_{55}}} = 0.132 \text{ rad/s} \quad \text{Frekuensi Natural Gerak } Pitch$$

$$T = 47.6370438 \text{ s} \quad \text{Periode Natural Gerak } Pitch$$

LAMPIRAN D-2
PERHITUNGAN FREKUENSI
DAN PERIODE NATURAL FWT SARAT 130M

Perhitungan Sarat 130 Meter

r	=	3.25	m	Jari-jari Platform Atas (Permukaan Air)
R	=	4.7	m	Jari-Jari Platform Bawah (Didalam Air)
ρ	=	1025	kg/m	Massa Jenis Air Laut
g	=	9.81	m/s^2	Percepatan Gravitasi
GM_T	=	7.988844444	m	Tinggi Metasentra Melintang
GM_L	=	7.988844444	m	Tinggi Metasentra Memanjang
∇	=	8361.039939	m^3	Volume
M_{33}	=	8,570,065.94	kg	Massa Struktur
I_{44}	=	68234000000	$kg.m^3$	Momen Inersia Massa Untuk Gerak <i>Roll</i>
I_{55}	=	68221000000	$kg.m^3$	Momen Inersia Massa Untuk Gerak <i>Pitch</i>
R_{44}	=	89.23	m	Jari-jari Girasi Gerak <i>Roll</i>
R_{55}	=	89.22	m	Jari-jari Girasi Gerak <i>Pitch</i>

Gerak *Heave*

$$\begin{aligned}
 k_{33} &= \rho \cdot g \cdot \pi \cdot r^2 && \text{Kekakuan } Heave \\
 &= 333,664.09 && \text{N/m} \\
 \\
 a_{33} &= \frac{4}{3} \cdot \rho \cdot r^3 && \text{Massa Tambah Gerak } Heave \\
 &= 141,891.43 && \text{kg} \\
 \\
 \omega_{nz} &= \sqrt{\frac{k_{33}}{M_{33} + a_{33}}} = 0.1957 \text{ rad/s} && \text{Frekuensi Natural Gerak } Heave \\
 \\
 T &= 32.10576374 && \text{s}
 \end{aligned}$$

Gerak *Roll*

$$\begin{aligned} k_{44} &= \rho \cdot g \cdot \nabla \cdot GM_T && \text{Kekakuan } Roll \\ &= 671640901 && \text{N/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{44} &= a_{33} \cdot R_{44} && \text{Momen Inersia Massa Tambah Gerak } Roll \\ &= 1129725271 && \text{kg} \end{aligned}$$

$$\omega_{n\emptyset} = \sqrt{\frac{k_{44}}{I_{44} + a_{44}}} = 0.098 \quad \text{rad/s} \quad \text{Frekuensi Natural Gerak } Roll$$

$$T = 63.85244112 \quad \text{s} \quad \text{Periode Natural Gerak } Roll$$

Gerak *Pitch*

$$\begin{aligned} k_{55} &= \rho \cdot g \cdot \nabla \cdot GM_L && \text{Kekakuan } Pitch \\ &= 671640901.01 && \text{N/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{55} &= a_{33} \cdot R_{55} && \text{Momen Inersia Massa Tambah Gerak } Pitch \\ &= 12659691.85 && \text{kg} \end{aligned}$$

$$\omega_{n\theta} = \sqrt{\frac{k_{55}}{I_{55} + a_{55}}} = 0.099 \quad \text{rad/s} \quad \text{Frekuensi Natural Gerak } pitch$$

$$T = 63.33016699 \quad \text{s} \quad \text{Periode Natural Gerak } Pitch$$

LAMPIRAN E

TABEL RAO FREE FLOATING FWT SARAT 120 M

RAO Floating Wind Turbine Sarat 120 M Free Floating									
ω	Surge			Sway			Heave		
	0 Deg	45 Deg	90 Deg	0 Deg	45 Deg	90 Deg	0 Deg	45 Deg	90 Deg
0.02	8.63855934	6.10838127	0.00011831	0.00028404	6.10838652	8.63855553	1.00236201	1.00236225	1.00236201
0.0757	2.30255556	1.62815309	3.2955E-05	1.4858E-05	1.62816489	2.30257368	1.04076147	1.04076171	1.04076159
0.1313	1.1978761	0.84702587	6.9334E-05	5.5767E-06	0.84704137	1.19789779	1.20741034	1.2074101	1.20740974
0.187	0.90274978	0.63834035	8.0283E-05	5.3792E-06	0.6383397	0.90274894	4.45186329	4.4518652	4.45186472
0.2426	0.70536983	0.49877194	8.822E-07	1.2354E-07	0.49877563	0.70537502	0.03230589	0.03230514	0.03230451
0.2983	0.57502639	0.40660524	2.0176E-06	3.0906E-07	0.40661225	0.57503664	0.24783567	0.24783535	0.24783522
0.3539	0.47165009	0.33350748	2.9361E-06	3.8071E-07	0.33351606	0.47166312	0.24544398	0.24544354	0.24544336
0.4096	0.38398582	0.27151909	2.4836E-06	9.2878E-08	0.27152836	0.38399875	0.20824298	0.20824273	0.20824265
0.4652	0.31053227	0.21957986	1.5535E-06	8.7774E-08	0.2195887	0.310545	0.16788316	0.16788302	0.16788296
0.5209	0.25083035	0.17736427	1.7846E-06	4.6347E-08	0.17737226	0.25084183	0.13257492	0.13257483	0.13257481
0.5765	0.20341702	0.14383797	1.2176E-06	1.0719E-07	0.14384504	0.20342717	0.10388256	0.10388254	0.10388245
0.6322	0.16622032	0.11753596	9.0138E-07	7.6133E-08	0.11754196	0.16622874	0.08136024	0.08136029	0.08136022
0.6878	0.13712507	0.09696268	7.3158E-07	1.1057E-07	0.09696756	0.13713217	0.06393505	0.06393508	0.06393505
0.7435	0.1142726	0.08080353	6.3283E-07	7.9601E-08	0.08080764	0.11427842	0.0504875	0.05048751	0.0504875
0.7991	0.09616285	0.06799803	4.8118E-07	6.6701E-08	0.06800146	0.0961677	0.04006675	0.04006675	0.04006672
0.8548	0.08164462	0.05773218	3.3597E-07	5.3115E-08	0.05773505	0.08164877	0.03193375	0.03193377	0.03193376
0.9104	0.06985782	0.04939769	2.8509E-07	3.2506E-08	0.04940009	0.06986128	0.02553753	0.02553752	0.02553752
0.9661	0.06016552	0.04254423	2.3319E-07	2.4329E-08	0.04254628	0.06016847	0.02047235	0.02047233	0.02047233
1.0217	0.05209634	0.03683852	1.7357E-07	1.4881E-08	0.03684027	0.05209886	0.01643874	0.01643873	0.01643874
1.0774	0.04529864	0.03203189	1.4475E-07	3.2984E-08	0.03203335	0.04530079	0.01321297	0.01321296	0.01321297
1.133	0.03950821	0.02793745	1.2164E-07	2.0874E-08	0.02793874	0.03951003	0.01062528	0.01062528	0.01062529
1.1887	0.03452536	0.02441408	9.3858E-08	1.7788E-08	0.0244152	0.03452697	0.00854511	0.0085451	0.00854512
1.2444	0.03019916	0.02135501	7.7354E-08	1.8742E-08	0.02135596	0.0302005	0.00687061	0.0068706	0.00687062
1.3	0.02641566	0.0186797	6.4776E-08	1.8088E-08	0.01868052	0.02641683	0.00552161	0.0055216	0.00552162

RAO Floating Wind Turbine Sarat 120 M Free Floating									
ω	Roll			Pitch			Yaw		
	0 Deg	45 Deg	90 Deg	0 Deg	45 Deg	90 Deg	0 Deg	45 Deg	90 Deg
0.02	1.9489E-06	0.01532018	0.02167484	0.02148777	0.01519375	1.9977E-07	0.00241603	0.1672982	0.23658401
0.0757	6.5471E-07	0.09924404	0.14035354	0.14025624	0.09917607	4.5536E-05	0.00016327	0.04458848	0.06305748
0.1313	5.8702E-06	0.59954792	0.84788853	0.84841894	0.599923	0.00049668	5.085E-05	0.02319676	0.03280512
0.187	5.464E-06	0.14528495	0.20546506	0.20550182	0.14531271	0.00050198	2.245E-05	0.01748132	0.02472229
0.2426	4.8487E-07	0.11099804	0.15697453	0.1570047	0.11101918	1.5081E-06	1.1396E-05	0.01365924	0.01931709
0.2983	1.6638E-07	0.1029039	0.14552797	0.14555775	0.10292498	1.8915E-05	6.2607E-06	0.01113527	0.01574767
0.3539	1.4109E-08	0.09905571	0.1400859	0.14011622	0.09907702	1.8359E-05	3.5936E-06	0.0091335	0.01291672
0.4096	1.997E-07	0.09467847	0.1338952	0.13392492	0.09469912	1.5197E-05	2.1288E-06	0.00743593	0.01051601
0.4652	3.6189E-08	0.08888725	0.12570544	0.12573292	0.08890692	1.1827E-05	1.2979E-06	0.00601353	0.00850443
0.5209	1.0606E-07	0.08199996	0.11596543	0.11599034	0.0820178	9.2678E-06	7.8974E-07	0.00485741	0.00686942
0.5765	8.9629E-08	0.07452635	0.10539597	0.10541853	0.07454224	7.1341E-06	4.8906E-07	0.00393925	0.00557094
0.6322	4.5209E-08	0.06697009	0.09470974	0.09472957	0.06698421	5.613E-06	3.0955E-07	0.00321892	0.00455224
0.6878	5.9657E-08	0.05971339	0.08444704	0.08446428	0.0597256	4.3848E-06	1.8859E-07	0.00265548	0.00375542
0.7435	6.3213E-08	0.05299225	0.07494186	0.07495698	0.05300305	3.4603E-06	1.1866E-07	0.00221293	0.00312956
0.7991	4.8692E-08	0.0469178	0.06635111	0.06636446	0.04692723	2.7578E-06	7.4167E-08	0.00186223	0.00263358
0.8548	2.7137E-08	0.04151175	0.05870587	0.05871742	0.04151999	2.1492E-06	4.2119E-08	0.00158108	0.00223597
0.9104	1.7535E-08	0.03674156	0.05195969	0.05196981	0.0367488	1.735E-06	2.4778E-08	0.00135283	0.00191317
0.9661	1.3026E-08	0.03254716	0.04602776	0.04603679	0.03255356	1.3808E-06	1.3144E-08	0.00116513	0.00164772
1.0217	2.1213E-08	0.02885866	0.04081147	0.04081937	0.02886434	1.1033E-06	6.1586E-09	0.00100887	0.00142673
1.0774	2.0921E-08	0.02560671	0.03621247	0.03621944	0.02561175	8.8073E-07	4.3377E-09	0.00087723	0.00124057
1.133	1.702E-08	0.02272772	0.03214095	0.03214711	0.02273221	7.1564E-07	5.1678E-09	0.0007651	0.00108199
1.1887	1.7071E-08	0.02016677	0.02851902	0.02852454	0.02017068	5.7251E-07	5.492E-09	0.00066861	0.00094552
1.2444	1.7268E-08	0.01787795	0.02528217	0.02528705	0.01788146	4.5855E-07	6.1355E-09	0.00058483	0.00082704
1.3	1.5677E-08	0.01582477	0.02237849	0.02238275	0.01582788	3.6638E-07	6.1792E-09	0.00051157	0.00072343

LAMPIRAN F-1
TABEL RAO FWT SARAT 120 M
DENGAN SISTEM TAMBAT

<i>Floating Wind Turbine Sarat 120 M dengan Taut Mooring</i>												
<i>Load Case 0 deg</i>							<i>Load Case 45 deg</i>					
Frekuensi	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
0.02126	2.91E-03	3.65E-07	3.51E-04	5.36E-07	1.73E-02	2.23E-03	0.002058	2.06E-03	3.51E-04	0.01225	1.22E-02	1.10E-02
0.07335	1.70E-02	1.77E-06	3.15E-04	1.52E-05	0.100139	3.38E-02	1.20E-02	1.20E-02	3.15E-04	7.10E-02	7.08E-02	8.37E-02
0.13164	0.112635	7.33E-05	2.60E-04	3.89E-04	0.654207	5.48E-02	8.12E-02	8.13E-02	2.49E-04	0.47258	0.4715	0.09158
0.18786	0.029781	2.32E-06	1.21E-04	1.06E-05	0.170461	4.93E-03	2.11E-02	2.11E-02	1.21E-04	0.12098	0.12091	1.46E-03
0.24617	2.41E-02	7.46E-07	2.55E-05	3.38E-06	0.136468	2.05E-03	1.71E-02	1.71E-02	1.95E-05	0.09653	9.65E-02	2.94E-03
0.29833	2.33E-02	4.02E-07	1.21E-04	1.92E-06	0.130754	1.28E-03	1.65E-02	1.65E-02	1.18E-04	9.26E-02	9.26E-02	3.08E-03
0.35324	2.31E-02	2.45E-07	2.01E-04	1.29E-06	0.128896	8.74E-04	1.64E-02	1.64E-02	1.99E-04	9.12E-02	9.12E-02	2.88E-03
0.41301	0.022533	1.43E-07	2.56E-04	8.80E-07	0.124861	6.08E-04	1.60E-02	1.59E-02	2.55E-04	8.84E-02	8.84E-02	2.55E-03
0.47144	2.14E-02	9.45E-08	2.83E-04	6.80E-07	0.117994	4.37E-04	1.52E-02	1.52E-02	2.83E-04	8.36E-02	8.36E-02	2.21E-03
0.52406	0.020078	5.11E-08	2.91E-04	4.89E-07	0.110075	3.27E-04	1.42E-02	1.42E-02	2.91E-04	7.81E-02	7.81E-02	1.92E-03
0.57247	1.87E-02	2.95E-08	2.89E-04	3.84E-07	0.101804	2.53E-04	1.32E-02	1.32E-02	2.88E-04	7.23E-02	7.23E-02	1.69E-03
0.62439	1.71E-02	1.72E-08	2.79E-04	3.09E-07	9.25E-02	1.92E-04	1.21E-02	1.21E-02	2.79E-04	6.58E-02	6.58E-02	1.47E-03
0.70109	1.48E-02	3.64E-09	2.58E-04	2.15E-07	7.93E-02	1.30E-04	1.05E-02	1.05E-02	2.59E-04	5.65E-02	5.65E-02	1.21E-03
0.72601	1.40E-02	4.05E-09	2.51E-04	1.92E-07	0.075169	1.15E-04	1.00E-02	1.00E-02	2.52E-04	5.35E-02	5.35E-02	1.13E-03

0.8206	1.16E-02	1.02E-08	2.21E-04	1.29E-07	6.12E-02	7.34E-05	9.11E-03	0.009103	2.37E-04	4.84E-02	4.84E-02	1.01E-03
0.85163	1.09E-02	1.13E-08	2.10E-04	1.16E-07	5.73E-02	6.37E-05	7.79E-03	7.79E-03	2.12E-04	4.09E-02	4.09E-02	8.35E-04
0.911	9.69E-03	1.24E-08	1.91E-04	9.28E-08	5.03E-02	4.90E-05	6.92E-03	6.92E-03	1.93E-04	3.59E-02	3.59E-02	7.28E-04
0.97037	0.008607	1.29E-08	1.73E-04	7.41E-08	4.42E-02	3.80E-05	6.15E-03	6.15E-03	1.74E-04	3.16E-02	3.16E-02	6.36E-04
1.00938	7.97E-03	1.27E-08	1.61E-04	6.16E-08	4.05E-02	3.23E-05	5.70E-03	5.69E-03	1.62E-04	2.90E-02	2.90E-02	5.83E-04
1.08409	6.89E-03	1.23E-08	1.40E-04	4.57E-08	3.45E-02	2.39E-05	4.93E-03	4.93E-03	1.41E-04	2.47E-02	0.02472	4.95E-04
1.1588	5.96E-03	1.19E-08	1.20E-04	3.29E-08	2.93E-02	1.78E-05	4.26E-03	4.26E-03	1.21E-04	0.02102	2.10E-02	4.21E-04
1.20111	5.49E-03	1.16E-08	1.10E-04	2.66E-08	0.026751	1.52E-05	3.93E-03	3.92E-03	1.11E-04	1.92E-02	1.92E-02	3.84E-04
1.27179	4.78E-03	1.08E-08	9.40E-05	1.85E-08	2.29E-02	1.16E-05	3.40E-03	3.40E-03	9.43E-05	1.63E-02	0.0163	3.28E-04
1.34246	4.29E-03	9.93E-09	8.80E-05	1.44E-08	0.020159	9.23E-06	3.04E-03	3.04E-03	8.76E-05	1.43E-02	0.01427	2.90E-04

<i>Floating Wind Turbine Sarat 120 M dengan Catenary Mooring</i>												
<i>Load Case 0 deg</i>							<i>Load Case 45 deg</i>					
Frekuensi	<i>surge</i>	<i>sway</i>	<i>heave</i>	<i>roll</i>	<i>pitch</i>	<i>yaw</i>	<i>surge</i>	<i>sway</i>	<i>heave</i>	<i>roll</i>	<i>pitch</i>	<i>yaw</i>
0.02126	1.88869	3.16E-04	0.9642	4.20E-07	2.23E-02	2.26E-05	1.33244	1.329366	0.96449	1.58E-02	1.58E-02	1.80E-03
0.0747	3.9786	3.87E-04	0.99973	7.99E-07	0.13951	2.44E-05	2.63713	2.640271	0.99965	0.10546	0.10549	1.99E-03
0.13131	1.38976	3.28E-05	1.15199	4.54E-06	0.82864	4.31E-05	0.98179	0.982131	1.14956	0.583	0.58383	7.84E-02
0.18465	0.9708	7.82E-06	3.06045	2.66E-06	0.20987	7.98E-05	0.6846	0.684744	3.05559	0.14815	0.14821	7.24E-02
0.24358	0.72088	2.21E-06	3.96E-02	5.84E-07	0.15651	1.66E-04	0.50979	0.509771	4.23E-02	0.11074	0.11067	0.12707
0.30015	0.57648	2.19E-06	0.24388	1.34E-07	0.14527	2.35E-04	0.40811	0.407957	0.24488	0.1027	0.1027	0.027259
0.3487	0.48523	1.60E-06	0.24141	1.66E-07	0.14057	1.28E-04	0.34262	0.342708	0.242	0.09938	9.94E-02	2.47E-02
0.41678	0.37391	6.44E-07	0.19741	1.62E-07	0.13271	1.63E-05	0.26417	0.264181	0.19766	9.38E-02	9.38E-02	1.32E-02
0.45112	0.32667	6.00E-07	0.17243	4.07E-08	0.12767	9.48E-06	0.23081	0.230819	0.17263	9.02E-02	9.03E-02	1.05E-02
0.5167	0.25351	5.40E-07	0.13149	1.07E-07	0.11658	6.60E-06	0.17912	0.179117	0.13159	8.24E-02	8.24E-02	7.25E-03
0.57614	0.20213	4.50E-07	0.1014	9.20E-08	0.10542	1.32E-05	0.14283	0.142824	0.10146	7.45E-02	7.45E-02	4.90E-03
0.6312	0.16516	3.96E-07	7.95E-02	5.14E-08	9.48E-02	3.08E-05	0.11677	0.116743	0.07955	6.70E-02	6.70E-02	2.96E-03
0.69045	0.13492	6.71E-07	6.14E-02	7.23E-08	8.39E-02	1.55E-05	9.53E-02	9.53E-02	6.14E-02	5.93E-02	5.93E-02	3.87E-03
0.73457	0.11646	4.44E-07	5.08E-02	7.02E-08	7.63E-02	5.23E-06	8.23E-02	8.23E-02	5.08E-02	0.05391	5.39E-02	2.96E-03

0.80755	9.27E-02	3.16E-07	3.79E-02	5.60E-08	6.51E-02	2.24E-06	6.55E-02	6.55E-02	3.79E-02	4.60E-02	4.60E-02	2.18E-03
0.86261	7.88E-02	2.81E-07	0.0303	3.63E-08	5.77E-02	2.89E-06	5.56E-02	5.56E-02	3.03E-02	4.07E-02	4.07E-02	1.76E-03
0.91767	6.75E-02	2.64E-07	2.42E-02	3.62E-08	5.11E-02	6.35E-06	4.77E-02	4.77E-02	2.42E-02	0.0361	3.61E-02	1.63E-03
0.95374	6.13E-02	3.51E-07	2.10E-02	4.06E-08	4.72E-02	1.62E-05	0.04325	4.33E-02	2.10E-02	0.03337	3.34E-02	1.70E-03
1.02263	5.11E-02	2.18E-07	1.59E-02	3.92E-08	0.04071	8.24E-06	0.03607	0.036072	1.59E-02	2.88E-02	0.02877	1.31E-03
1.09152	4.30E-02	1.90E-07	0.01217	3.17E-08	3.51E-02	1.34E-06	3.04E-02	3.04E-02	1.22E-02	2.48E-02	2.48E-02	9.39E-04
1.13543	3.89E-02	1.53E-07	1.03E-02	3.02E-08	3.20E-02	1.07E-06	2.75E-02	0.027474	1.03E-02	2.26E-02	2.26E-02	8.33E-04
1.21746	0.032	1.12E-07	7.50E-03	3.46E-08	2.68E-02	4.90E-06	2.26E-02	2.26E-02	7.47E-03	1.89E-02	1.89E-02	6.42E-04
1.29949	2.62E-02	9.66E-08	5.39E-03	3.07E-08	2.24E-02	7.07E-06	1.86E-02	1.86E-02	5.42E-03	1.59E-02	1.59E-02	5.05E-04
1.32783	2.51E-02	4.30E-08	5.15E-03	2.76E-08	2.14E-02	4.56E-06	1.78E-02	1.78E-02	5.16E-03	1.52E-02	1.52E-02	4.92E-04

LAMPIRAN F-2
TABEL RAO FWT SARAT 130 M
DENGAN SISTEM TAMBAT

Frekuensi	<i>Floating Wind Turbine Sarat 130 M dengan Taut Mooring</i>											
	<i>Load Case 0 Deg</i>						<i>Load Case 45 Deg</i>					
	<i>Surge</i>	<i>Sway</i>	<i>Heave</i>	<i>Roll</i>	<i>Pitch</i>	<i>Yaw</i>	<i>Surge</i>	<i>Sway</i>	<i>Heave</i>	<i>Roll</i>	<i>Pitch</i>	<i>Yaw</i>
0.02	0.00179	3.3E-07	0.00041	1.8E-06	0.009813	2.92E-05	0.00127	0.00126	0.00041	0.006909	0.006939	0.00011
0.07565	0.01285	1.6E-06	0.00037	9E-06	0.071493	2.63E-05	0.00909	0.00904	0.00037	0.050264	0.050542	0.00083
0.1313	0.00112	7.9E-07	0.00027	4.5E-06	0.00434	2.01E-05	0.0008	0.00083	0.00027	0.003279	0.00314	0.00072
0.18696	0.00646	2.6E-07	0.00014	1.5E-06	0.033664	9.31E-06	0.00462	0.00463	0.00014	0.024133	0.024074	0.0006
0.24261	0.01045	8.6E-08	1.1E-05	4E-07	0.055288	6.05E-06	0.00743	0.00744	1.1E-05	0.03938	0.039346	0.00071
0.29826	0.01326	8.4E-08	0.00012	3.7E-07	0.070455	2.32E-05	0.00942	0.00942	0.00012	0.050057	0.050036	0.00102
0.35391	0.01536	1.1E-07	0.0002	5.4E-07	0.081669	4.92E-05	0.01088	0.01088	0.0002	0.057877	0.057864	0.00182
0.40957	0.01638	7.4E-08	0.00024	2.4E-07	0.086999	0.000125	0.01159	0.01158	0.00024	0.061549	0.061539	0.00488
0.46522	0.01641	7.9E-08	0.00026	1.5E-07	0.086998	0.000421	0.0116	0.0116	0.00026	0.061509	0.061516	0.01848
0.52087	0.01566	3.7E-08	0.00025	2.5E-08	0.082731	6.39E-05	0.01107	0.01107	0.00025	0.058514	0.058515	0.00339
0.57652	0.01452	3.2E-08	0.00023	1.4E-08	0.076383	3.1E-05	0.01027	0.01027	0.00023	0.054041	0.054043	0.00201
0.63217	0.01343	2.9E-08	0.00021	3.1E-08	0.070376	1.98E-05	0.0095	0.0095	0.00021	0.049794	0.049796	0.00152
0.68783	0.01157	2.4E-08	0.00018	1.9E-08	0.060133	1.06E-05	0.00819	0.00819	0.00018	0.042561	0.042563	0.00108

0.74348	0.011	2.3E-08	0.00016	1.2E-08	0.056998	8.77E-06	0.00779	0.00779	0.00016	0.040342	0.040344	0.00098
0.79913	0.00998	2.1E-08	0.00014	1.3E-08	0.051353	6.25E-06	0.00706	0.00706	0.00014	0.036352	0.036354	0.00084
0.85478	0.0085	1.8E-08	0.00011	6.4E-09	0.043212	3.65E-06	0.00602	0.00601	0.00011	0.030596	0.030597	0.00066
0.91043	0.00754	1.5E-08	9E-05	5.4E-09	0.037954	2.46E-06	0.00534	0.00534	9E-05	0.026875	0.026876	0.00056
0.96609	0.00671	1.4E-08	7.2E-05	6E-09	0.033444	1.66E-06	0.00475	0.00475	7.1E-05	0.023684	0.023685	0.00049
1.02174	0.00627	1.3E-08	6.2E-05	6.6E-09	0.031012	1.3E-06	0.00444	0.00444	6.2E-05	0.02196	0.021961	0.00045
1.07739	0.00556	1.1E-08	4.7E-05	5.3E-09	0.027148	8.42E-07	0.00394	0.00394	4.7E-05	0.01922	0.019221	0.00039
1.13304	0.00495	1E-08	3.5E-05	3.2E-09	0.023823	5.43E-07	0.0035	0.0035	3.5E-05	0.016861	0.016862	0.00034
1.1887	0.00466	9.7E-09	2.9E-05	3.9E-09	0.022233	4.26E-07	0.0033	0.00329	2.9E-05	0.015737	0.015738	0.00032
1.24435	0.00423	9E-09	2.2E-05	1.6E-09	0.019945	2.9E-07	0.003	0.003	2.2E-05	0.014122	0.014123	0.00028
1.3	0.00373	7.9E-09	1.6E-05	1.8E-09	0.017231	1.81E-07	0.00264	0.00264	1.6E-05	0.0122	0.0122	0.00024

Frekuensi	<i>Floating Wind Turbine Sarat 130 M dengan Catenary Mooring</i>											
	<i>Load Case 0 Deg</i>						<i>Load Case 45 Deg</i>					
	<i>Surge</i>	<i>Sway</i>	<i>Heave</i>	<i>Roll</i>	<i>Pitch</i>	<i>Yaw</i>	<i>Surge</i>	<i>Sway</i>	<i>Heave</i>	<i>Roll</i>	<i>Pitch</i>	<i>Yaw</i>
0.02	2.138559	0.04866	0.96451	0.01517	0.01236	3.73241	1.52143	1.28844	0.96476	0.01486	0.01198	2.6747
0.07565	3.20026	0.01653	1.00862	0.11226	0.5421	6.60249	2.26044	2.54222	1.00545	0.40682	0.38142	4.74951
0.1313	1.293414	0.00614	1.16694	0.03098	0.20359	4.33764	0.93414	0.97985	1.14555	0.15036	0.15062	2.8785
0.18696	0.983128	0.01522	2.63564	0.0784	0.02428	21.2459	0.68496	0.62933	2.4509	0.03195	0.02073	14.0991
0.24261	0.657499	0.00389	0.0061	0.00223	0.09868	0.96448	0.45496	0.45926	0.02129	0.0722	0.07044	0.53727
0.29826	0.520352	0.00316	0.19185	0.0001	0.10476	0.27796	0.36496	0.36913	0.19356	0.07506	0.0739	0.15295
0.35391	0.407018	0.00262	0.18942	0.00049	0.10746	0.07623	0.29302	0.29674	0.19322	0.07654	0.0755	0.07133
0.40957	0.334832	0.00215	0.1607	0.00062	0.10615	0.02122	0.23937	0.24239	0.15034	0.07571	0.07476	0.01531
0.46522	0.265783	0.0017	0.12538	0.00066	0.10133	0.02047	0.18856	0.19093	0.11277	0.07224	0.07138	0.02166
0.52087	0.20282	0.00129	0.09046	0.00063	0.09289	0.02939	0.1422	0.14397	0.09034	0.06599	0.06523	0.02873
0.57652	0.168648	0.00107	0.07095	0.00059	0.08584	0.03056	0.11719	0.11865	0.07002	0.06075	0.06005	0.02947
0.63217	0.130459	0.00081	0.0496	0.00052	0.07557	0.02952	0.08947	0.09057	0.04789	0.05299	0.05238	0.02702
0.68783	0.104652	0.00066	0.03535	0.00046	0.06639	0.02711	0.07076	0.07163	0.03335	0.04603	0.0455	0.02

0.74348	0.08338	0.00052	0.02449	0.0004	0.05736	0.02429	0.06104	0.06178	0.02257	0.04191	0.04143	0.01924
0.79913	0.071181	0.00044	0.01874	0.00036	0.05147	0.02186	0.04709	0.04765	0.01689	0.03501	0.03461	0.01672
0.85478	0.0613	0.00038	0.01425	0.00032	0.04619	0.0201	0.0402	0.04068	0.01251	0.03119	0.03083	0.0156
0.91043	0.055836	0.00034	0.00834	0.0003	0.04309	0.01914	0.03641	0.03685	0.01023	0.02894	0.02862	0.01475
0.96609	0.047216	0.00029	0.00581	0.00027	0.03786	0.01806	0.03047	0.03083	0.00691	0.02517	0.02488	0.01289
1.02174	0.036481	0.00022	0.00455	0.00022	0.03085	0.0176	0.02572	0.02603	0.00465	0.02198	0.02174	0.01303
1.07739	0.030579	0.00018	0.0029	0.00019	0.0266	0.01672	0.02325	0.02353	0.00359	0.02024	0.02002	0.01287
1.13304	0.025972	0.00016	0.00182	0.00016	0.02301	0.0164	0.0196	0.01986	0.00215	0.01744	0.01724	0.01351
1.1887	0.023883	0.00014	0.00138	0.00014	0.0213	0.01036	0.01669	0.0169	0.00131	0.01507	0.01489	0.00787
1.24435	0.020951	0.00012	0.00085	0.00012	0.01886	0.00368	0.0155	0.01569	0.00104	0.01407	0.0139	0.00469
1.3	0.018801	0.00011	0.00068	0.00011	0.01704	0.00402	0.01406	0.01423	0.00076	0.01288	0.01272	0.00313

LAMPIRAN G-1
TABEL RESPON SPEKTRA *TAUT MOORING*

<i>Taut</i> <i>Mooring</i>	<i>Surge</i>	0 Deg	
	Hs	2.351	m
	Tp	5	s
	ω	1.25664	rad/s
	g	2.5	

ω	S(ω)	RAO		RAO ²		Sr(ω)	
(rad/s)	(m ² /rad/s)	130 M	120 M	130 M	120 M	130 M	120 M
0.0213	0.00000	1.79E-03	3.04E-03	3.22E-06	9.246E-06	0	0
0.0775	0.00000	1.71E-02	2.05E-02	0.000292	0.0004222	0	0
0.1312	0.00000	9.51E-04	0.108946	9.04E-07	0.0118691	0	0
0.1878	0.00000	6.54E-03	0.029512	4.28E-05	0.000871	0	0
0.2461	0.00000	1.05E-02	2.38E-02	0.000111	0.0005677	0	0
0.2982	0.00000	0.01333	2.29E-02	0.000178	0.0005255	2E-172	4E-172
0.3531	0.00000	1.54E-02	2.27E-02	0.000237	0.0005141	1.1E-88	2.4E-88
0.4129	0.00000	1.64E-02	2.20E-02	0.000268	0.0004857	1.8E-48	3.3E-48
0.4572	0.00000	1.65E-02	2.12E-02	0.000271	0.0004503	4.4E-33	7.3E-33
0.5268	0.00000	1.64E-02	1.95E-02	0.00027	0.0003797	5.5E-20	7.8E-20
0.5752	0.00000	1.60E-02	1.81E-02	0.000257	0.0003277	5.5E-15	7E-15
0.6324	0.00000	1.36E-02	1.64E-02	0.000185	0.0002683	2E-11	2.9E-11
0.6922	0.00003	1.12E-02	1.46E-02	0.000126	0.0002135	3.2E-09	5.4E-09
0.7286	0.00024	1.02E-02	0.013582	0.000104	0.0001845	2.5E-08	4.5E-08
0.765	0.00135	0.00928	0.012622	8.61E-05	0.0001593	1.2E-07	2.2E-07
0.7911	0.00359	8.72E-03	0.011978	7.6E-05	0.0001435	2.7E-07	5.1E-07
0.8446	0.01614	7.75E-03	1.07E-02	6.01E-05	0.0001154	9.7E-07	1.9E-06
0.8981	0.04508	6.92E-03	9.64E-03	4.79E-05	9.296E-05	2.2E-06	4.2E-06
0.9334	0.07383	6.45E-03	8.98E-03	4.16E-05	8.063E-05	3.1E-06	6E-06
1.0013	0.14390	5.69E-03	7.85E-03	3.24E-05	6.155E-05	4.7E-06	8.9E-06
1.0692	0.22999	5.04E-03	6.87E-03	2.54E-05	4.717E-05	5.8E-06	1.1E-05
1.1103	0.30432	4.74E-03	6.34E-03	2.25E-05	4.017E-05	6.8E-06	1.2E-05
1.1834	0.53340	4.32E-03	5.50E-03	1.87E-05	3.025E-05	1E-05	1.6E-05
1.2565	0.72560	3.94E-03	4.77E-03	1.55E-05	2.271E-05	1.1E-05	1.6E-05
1.2975	0.65414	3.69E-03	4.40E-03	1.36E-05	1.932E-05	8.9E-06	1.3E-05
1.3655	0.41768	3.30E-03	4.04E-03	1.09E-05	1.63E-05	4.5E-06	6.8E-06
1.4335	0.28304	2.98E-03	3.74E-03	8.86E-06	1.395E-05	2.5E-06	3.9E-06
1.4862	0.23824	2.78E-03	3.53E-03	7.75E-06	1.246E-05	1.8E-06	3E-06
1.5994	0.18846	2.47E-03	3.16E-03	6.09E-06	9.969E-06	1.1E-06	1.9E-06
1.7126	0.14998	2.22E-03	2.86E-03	4.93E-06	8.166E-06	7.4E-07	1.2E-06
1.7798	0.13029	2.13E-03	2.71E-03	4.54E-06	7.327E-06	5.9E-07	9.5E-07
1.8975	0.10147	2.05E-03	2.48E-03	4.2E-06	6.158E-06	4.3E-07	6.2E-07
2.0152	0.07906	1.97E-03	2.30E-03	3.9E-06	5.272E-06	3.1E-07	4.2E-07

<i>Taut Mooring</i>	<i>Heave</i>	0 Deg	
	Hs	2.351	m
	Tp	5	s
	ω	1.256637	rad/s
	g	2.5	

ω	S(ω)	RAO		RAO ²		Sr(ω)	
(rad/s)	(m ² /rad/s)	130 M	120 M	130 M	120 M	130 M	120 M
0.02126	0.00000	4.09E-04	4.09E-04	1.68E-07	1.68E-07	0	0
0.07751	0.00000	3.63E-04	3.63E-04	1.31E-07	1.32E-07	0	0
0.13119	0.00000	2.79E-04	3.02E-04	7.81E-08	9.11E-08	0	0
0.18778	0.00000	1.39E-04	1.42E-04	1.92E-08	2.01E-08	0	0
0.24606	0.00000	1.30E-05	2.93E-05	1.69E-10	8.58E-10	0	0
0.2982	0.00000	1.22E-04	1.41E-04	1.5E-08	1.97E-08	1E-176	2E-176
0.3531	0.00000	2.02E-04	2.35E-04	4.06E-08	5.51E-08	1.9E-92	2.6E-92
0.41286	0.00000	2.44E-04	2.99E-04	5.97E-08	8.96E-08	4E-52	6.1E-52
0.47034	0.00000	2.53E-04	3.31E-04	6.4E-08	1.09E-07	1.9E-33	3.3E-33
0.52677	0.00000	2.55E-04	3.40E-04	6.49E-08	1.16E-07	1.3E-23	2.4E-23
0.57114	0.00000	2.55E-04	3.37E-04	6.51E-08	1.14E-07	6.4E-19	1.1E-18
0.63238	0.00000	2.15E-04	3.24E-04	4.63E-08	1.05E-07	5E-15	1.1E-14
0.69218	0.00003	1.69E-04	3.05E-04	2.84E-08	9.31E-08	7.2E-13	2.4E-12
0.72858	0.00024	1.48E-04	2.92E-04	2.18E-08	8.54E-08	5.3E-12	2.1E-11
0.76497	0.00135	1.28E-04	2.79E-04	1.63E-08	7.77E-08	2.2E-11	1E-10
0.79112	0.00359	1.16E-04	2.69E-04	1.34E-08	7.23E-08	4.8E-11	2.6E-10
0.84459	0.01614	9.44E-05	2.49E-04	8.92E-09	6.18E-08	1.4E-10	1E-09
0.89805	0.04508	7.60E-05	2.29E-04	5.77E-09	5.22E-08	2.6E-10	2.4E-09
0.93338	0.07383	6.60E-05	2.16E-04	4.35E-09	4.64E-08	3.2E-10	3.4E-09
1.00131	0.14390	4.96E-05	1.91E-04	2.46E-09	3.66E-08	3.5E-10	5.3E-09
1.06923	0.22999	3.65E-05	1.68E-04	1.34E-09	2.83E-08	3.1E-10	6.5E-09
1.11027	0.30432	3.11E-05	1.55E-04	9.67E-10	2.41E-08	2.9E-10	7.3E-09
1.18337	0.53340	2.39E-05	1.33E-04	5.73E-10	1.78E-08	3.1E-10	9.5E-09
1.25647	0.72560	1.82E-05	1.14E-04	3.3E-10	1.3E-08	2.4E-10	9.4E-09
1.29753	0.65414	1.61E-05	1.04E-04	2.58E-10	1.07E-08	1.7E-10	7E-09
1.36551	0.41768	1.59E-05	1.03E-04	2.53E-10	1.06E-08	1.1E-10	4.4E-09
1.43349	0.28304	1.58E-05	1.03E-04	2.5E-10	1.06E-08	7.1E-11	3E-09
1.48621	0.23824	1.57E-05	1.03E-04	2.48E-10	1.07E-08	5.9E-11	2.5E-09
1.59941	0.18846	1.57E-05	1.03E-04	2.46E-10	1.07E-08	4.6E-11	2E-09
1.71261	0.14998	1.56E-05	1.04E-04	2.45E-10	1.08E-08	3.7E-11	1.6E-09
1.77981	0.13029	1.56E-05	1.04E-04	2.45E-10	1.08E-08	3.2E-11	1.4E-09
1.89752	0.10147	1.56E-05	1.04E-04	2.45E-10	1.09E-08	2.5E-11	1.1E-09
2.01524	0.07906	1.57E-05	1.05E-04	2.45E-10	1.1E-08	1.9E-11	8.7E-10

<i>Taut Mooring</i>	<i>Pitch</i>	0 Deg	
	Hs	2.351	m
	Tp	5	s
	ω	1.25664	rad/s
	g	2.5	

ω	S(ω)	RAO		RAO ²		Sr(ω)	
(rad/s)	(m ² /rad/s)	130 M	120 M	130 M	120 M	130 M	120 M
0.02126	0.00000	9.81E-03	1.86E-02	9.6E-05	0.00035	0	0
0.07335	0.00000	7.16E-02	0.108495	0.00512	0.01177	0	0
0.13119	0.00000	3.45E-03	0.653677	1.2E-05	0.42729	0	0
0.18778	0.00000	0.03412	0.174642	0.00116	0.0305	0	0
0.24606	0.00000	5.57E-02	0.139425	0.0031	0.01944	0	0
0.2982	0.00000	7.08E-02	0.133117	0.00502	0.01772	4E-171	2E-170
0.3531	0.00000	8.19E-02	0.130814	0.0067	0.01711	3.2E-87	8.1E-87
0.41286	0.00000	0.08704	0.126397	0.00758	0.01598	5.1E-47	1.1E-46
0.47034	0.00000	8.73E-02	0.119389	0.00762	0.01425	2.3E-28	4.3E-28
0.52677	0.00000	8.72E-02	0.110569	0.00761	0.01223	1.6E-18	2.5E-18
0.57114	0.00000	8.54E-02	0.102862	0.0073	0.01058	7.2E-14	1E-13
0.63238	0.00000	7.14E-02	9.19E-02	0.0051	0.00845	5.5E-10	9.1E-10
0.69218	0.00003	5.82E-02	8.14E-02	0.00339	0.00662	8.6E-08	1.7E-07
0.72858	0.00024	5.26E-02	7.53E-02	0.00277	0.00567	6.7E-07	1.4E-06
0.76497	0.00135	0.04752	6.96E-02	0.00226	0.00484	3E-06	6.5E-06
0.79112	0.00359	4.44E-02	6.58E-02	0.00197	0.00433	7.1E-06	1.6E-05
0.84459	0.01614	3.91E-02	5.85E-02	0.00153	0.00342	2.5E-05	5.5E-05
0.89805	0.04508	3.46E-02	5.20E-02	0.00119	0.0027	5.4E-05	0.00012
0.93338	0.07383	3.20E-02	4.81E-02	0.00102	0.00232	7.6E-05	0.00017
1.00131	0.14390	2.78E-02	4.15E-02	0.00078	0.00172	0.00011	0.00025
1.06923	0.22999	2.43E-02	0.035826	0.00059	0.00128	0.00014	0.0003
1.11027	0.30432	2.27E-02	3.28E-02	0.00051	0.00107	0.00016	0.00033
1.18337	0.53340	2.04E-02	2.80E-02	0.00042	0.00078	0.00022	0.00042
1.25647	0.72560	1.84E-02	2.38E-02	0.00034	0.00057	0.00025	0.00041
1.29753	0.65414	1.70E-02	2.17E-02	0.00029	0.00047	0.00019	0.00031
1.36551	0.41768	1.48E-02	1.96E-02	0.00022	0.00038	9.1E-05	0.00016
1.43349	0.28304	1.29E-02	1.78E-02	0.00017	0.00032	4.7E-05	8.9E-05
1.48621	0.23824	1.19E-02	1.65E-02	0.00014	0.00027	3.3E-05	6.5E-05
1.59941	0.18846	1.00E-02	1.42E-02	0.0001	0.0002	1.9E-05	3.8E-05
1.71261	0.14998	8.60E-03	1.24E-02	7.4E-05	0.00015	1.1E-05	2.3E-05
1.77981	0.13029	8.09E-03	0.011486	6.6E-05	0.00013	8.5E-06	1.7E-05
1.89752	0.10147	7.61E-03	1.01E-02	5.8E-05	0.0001	5.9E-06	1E-05
2.01524	0.07906	7.17E-03	8.95E-03	5.1E-05	8E-05	4.1E-06	6.3E-06

LAMPIRAN G-2
TABEL RESPON SPEKTRA *CATENARY MOORING*

Catenary Mooring	Surge	0 Deg	
	Hs	2.351	m
	Tp	5	s
	ω	1.2566	rad/s
	g	2.5	

ω	S(ω)	RAO		RAO ²		Sr(ω)	
		130 M	120 M	130 M	120 M	130 M	120 M
(rad/s)	(m ² /rad/s)						
0.02	0	2.1386	1.88869	4.573434	3.567152	0	0
0.07565	0	3.2003	3.9786	10.24167	15.82924	0	0
0.1313	0	1.2934	1.38976	1.672919	1.931436	0	0
0.18696	0	0.9831	0.9708	0.966541	0.94245	0	0
0.24261	0	0.6575	0.72088	0.432304	0.519662	0	0
0.29826	1.2E-168	0.5204	0.57648	0.270766	0.332329	3E-169	4E-169
0.35391	2.93E-84	0.407	0.48523	0.165664	0.23545	4.9E-85	6.9E-85
0.40957	2.15E-46	0.3348	0.37391	0.112112	0.139805	2.4E-47	3E-47
0.46522	1.83E-27	0.2658	0.32667	0.070641	0.106713	1.3E-28	2E-28
0.52087	3.36E-17	0.2028	0.25351	0.041136	0.064267	1.4E-18	2.2E-18
0.57652	2.78E-11	0.1686	0.20213	0.028442	0.040856	7.9E-13	1.1E-12
0.63217	1.05E-07	0.1305	0.16516	0.01702	0.027279	1.8E-09	2.9E-09
0.68783	1.85E-05	0.1047	0.13492	0.010952	0.018203	2E-07	3.4E-07
0.74348	0.000519	0.0834	0.11646	0.006952	0.013563	3.6E-06	7E-06
0.79913	0.004668	0.0712	0.09268	0.005067	0.008589	2.4E-05	4E-05
0.85478	0.020259	0.0613	0.07877	0.003758	0.006204	7.6E-05	0.00013
0.91043	0.054356	0.0558	0.0675	0.003118	0.004556	0.00017	0.00025
0.96609	0.105742	0.0472	0.06126	0.002229	0.003752	0.00024	0.0004
1.02174	0.167527	0.0365	0.05107	0.001331	0.002608	0.00022	0.00044
1.07739	0.242664	0.0306	0.043	0.000935	0.001849	0.00023	0.00045
1.13304	0.360866	0.026	0.03886	0.000675	0.00151	0.00024	0.00054
1.1887	0.554131	0.0239	0.032	0.00057	0.001024	0.00032	0.00057
1.24435	0.718474	0.021	0.02625	0.000439	0.000689	0.00032	0.00049
1.3	0.646235	0.0188	0.02511	0.000353	0.000631	0.00023	0.00041
1.37814	0.383017	0.0185	0.02328	0.000342	0.000542	0.00013	0.00021
1.48249	0.240541	0.0164	0.02006	0.000269	0.000402	6.5E-05	9.7E-05
1.58683	0.193137	0.0147	0.01747	0.000215	0.000305	4.2E-05	5.9E-05
1.66172	0.166477	0.0135	0.01591	0.000182	0.000253	3E-05	4.2E-05
1.81471	0.121008	0.0114	0.01325	0.000129	0.000175	1.6E-05	2.1E-05
1.96771	0.087412	0.0097	0.01136	9.4E-05	0.000129	8.2E-06	1.1E-05
2.01643	0.078864	0.0091	0.01084	8.31E-05	0.000117	6.6E-06	9.3E-06
2.03086	0.076506	0.0086	0.01069	7.35E-05	0.000114	5.6E-06	8.7E-06
2.04529	0.074224	0.0081	0.01054	6.53E-05	0.000111	4.8E-06	8.2E-06

<i>Catenary Mooring</i>	<i>Heave</i>	0 Deg	
	Hs	2.351	m
	Tp	5	s
	ω	1.25664	rad/s
	g	2.5	

ω	S(ω)	RAO		RAO ²		Sr(ω)	
(rad/s)	(m ² /rad/s)	130 M	120 M	130 M	120 M	130 M	120 M
0.02	0	0.96451	0.964203	0.930273	0.92969	0	0
0.07565	0	1.00862	0.999729	1.01731	0.99946	0	0
0.1313	0	1.16694	1.151988	1.361743	1.32708	0	0
0.18696	0	2.63564	3.060447	6.946585	9.36634	0	0
0.24261	0	0.0061	0.039571	3.72E-05	0.00157	0	0
0.29826	1.2E-168	0.19185	0.243881	0.036805	0.05948	4E-170	6.9E-170
0.35391	2.93E-84	0.18942	0.241408	0.035881	0.05828	1.1E-85	1.71E-85
0.40957	2.15E-46	0.1607	0.197411	0.025824	0.03897	5.5E-48	8.36E-48
0.46522	1.83E-27	0.12538	0.172434	0.015721	0.02973	2.9E-29	5.45E-29
0.52087	3.36E-17	0.09046	0.13149	0.008184	0.01729	2.8E-19	5.81E-19
0.57652	2.78E-11	0.07095	0.101403	0.005034	0.01028	1.4E-13	2.86E-13
0.63217	1.05E-07	0.0496	0.079511	0.00246	0.00632	2.6E-10	6.64E-10
0.68783	1.85E-05	0.03535	0.06139	0.001249	0.00377	2.3E-08	6.96E-08
0.74348	0.000519	0.02449	0.050764	0.0006	0.00258	3.1E-07	1.34E-06
0.79913	0.004668	0.01874	0.037945	0.000351	0.00144	1.6E-06	6.72E-06
0.85478	0.020259	0.01425	0.030297	0.000203	0.00092	4.1E-06	1.86E-05
0.91043	0.054356	0.00834	0.024225	6.96E-05	0.00059	3.8E-06	3.19E-05
0.96609	0.105742	0.00581	0.020955	3.37E-05	0.00044	3.6E-06	4.64E-05
1.02174	0.167527	0.00455	0.015904	2.07E-05	0.00025	3.5E-06	4.24E-05
1.07739	0.242664	0.0029	0.012173	8.39E-06	0.00015	2E-06	3.6E-05
1.13304	0.360866	0.00182	0.010331	3.33E-06	0.00011	1.2E-06	3.85E-05
1.1887	0.554131	0.00138	0.007501	1.89E-06	5.6E-05	1E-06	3.12E-05
1.24435	0.718474	0.00085	0.005389	7.22E-07	2.9E-05	5.2E-07	2.09E-05
1.3	0.646235	0.00068	0.005146	4.68E-07	2.6E-05	3E-07	1.71E-05
1.37814	0.383017	0.00067	0.004764	4.55E-07	2.3E-05	1.7E-07	8.69E-06
1.48249	0.240541	0.0006	0.004092	3.59E-07	1.7E-05	8.6E-08	4.03E-06
1.58683	0.193137	0.00053	0.003559	2.86E-07	1.3E-05	5.5E-08	2.45E-06
1.66172	0.166477	0.00049	0.003243	2.42E-07	1.1E-05	4E-08	1.75E-06
1.81471	0.121008	0.00041	0.002689	1.72E-07	7.2E-06	2.1E-08	8.75E-07
1.96771	0.087412	0.00036	0.00231	1.27E-07	5.3E-06	1.1E-08	4.66E-07
2.01643	0.078864	0.00034	0.002204	1.17E-07	4.9E-06	9.2E-09	3.83E-07
2.03086	0.076506	0.00033	0.002172	1.07E-07	4.7E-06	8.2E-09	3.61E-07
2.04529	0.074224	0.00031	0.002141	9.66E-08	4.6E-06	7.2E-09	3.4E-07

<i>Catenary Mooring</i>	<i>Pitch</i>	0 Deg	
	Hs	2.351	m
	Tp	5	s
	ω	1.25664	rad/s
	g	2.5	

ω	S(ω)	RAO		RAO ²		Sr(ω)	
(rad/s)	(m ² /rad/s)	130 M	120 M	130 M	120 M	130 M	120 M
0.02	0	0.01236	0.022335	0.000153	0.000499	0	0
0.07565	0	0.5421	0.139515	0.293873	0.019464	0	0
0.1313	0	0.20359	0.828636	0.041451	0.686638	0	0
0.18696	0	0.02428	0.209866	0.00059	0.044044	0	0
0.24261	0	0.09868	0.156511	0.009738	0.024496	0	0
0.29826	1E-168	0.10476	0.145269	0.010974	0.021103	1E-170	2.5E-170
0.35391	2.9E-84	0.10746	0.140569	0.011548	0.01976	3.4E-86	5.79E-86
0.40957	2.1E-46	0.10615	0.132709	0.011267	0.017612	2.4E-48	3.78E-48
0.46522	1.8E-27	0.10133	0.127674	0.010269	0.016301	1.9E-29	2.99E-29
0.52087	3.4E-17	0.09289	0.116577	0.008629	0.01359	2.9E-19	4.57E-19
0.57652	2.8E-11	0.08584	0.105415	0.007368	0.011112	2E-13	3.09E-13
0.63217	1.1E-07	0.07557	0.094843	0.005711	0.008995	6E-10	9.45E-10
0.68783	1.8E-05	0.06639	0.083914	0.004407	0.007042	8.1E-08	1.3E-07
0.74348	0.00052	0.05736	0.076304	0.00329	0.005822	1.7E-06	3.02E-06
0.79913	0.00467	0.05147	0.065068	0.002649	0.004234	1.2E-05	1.98E-05
0.85478	0.02026	0.04619	0.057656	0.002134	0.003324	4.3E-05	6.73E-05
0.91043	0.05436	0.04309	0.051106	0.001856	0.002612	0.0001	0.000142
0.96609	0.10574	0.03786	0.047232	0.001433	0.002231	0.00015	0.000236
1.02174	0.16753	0.03085	0.040713	0.000952	0.001658	0.00016	0.000278
1.07739	0.24266	0.0266	0.035096	0.000707	0.001232	0.00017	0.000299
1.13304	0.36087	0.02301	0.031955	0.00053	0.001021	0.00019	0.000368
1.1887	0.55413	0.0213	0.02677	0.000454	0.000717	0.00025	0.000397
1.24435	0.71847	0.01886	0.022395	0.000356	0.000502	0.00026	0.00036
1.3	0.64623	0.01704	0.021435	0.00029	0.000459	0.00019	0.000297
1.37814	0.38302	0.01676	0.019888	0.000281	0.000396	0.00011	0.000151
1.48249	0.24054	0.01491	0.017169	0.000222	0.000295	5.3E-05	7.09E-05
1.58683	0.19314	0.01336	0.014973	0.000178	0.000224	3.4E-05	4.33E-05
1.66172	0.16648	0.0123	0.013647	0.000151	0.000186	2.5E-05	3.1E-05
1.81471	0.12101	0.01039	0.011431	0.000108	0.000131	1.3E-05	1.58E-05
1.96771	0.08741	0.0089	0.009716	7.92E-05	9.44E-05	6.9E-06	8.25E-06
2.01643	0.07886	0.00837	0.009251	7.01E-05	8.56E-05	5.5E-06	6.75E-06
2.03086	0.07651	0.00788	0.009119	6.21E-05	8.32E-05	4.8E-06	6.36E-06
2.04529	0.07422	0.00743	0.008991	5.52E-05	8.08E-05	4.1E-06	6E-06

LAMPIRAN H
PERHITUNGAN KOEFISIEN HIDRODINAMIK,
BEBAN ANGIN DAN KRITERIA STABILITAS

PERHITUNGAN KOEFISIEN HIDRODINAMIK

Tinggi Gelombang Maksimum (H)	=	2.351	m
Periode Gelombang (T)	=	5	s
Kedalaman Perairan (MWL)	=	320	m
Gravitasi	=	9.81	m/s

I. MENENTUKAN FREKUENSI GELOMBANG

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{6.283}{5} = 1.257 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Menentukan harga k, dengan asumsi **tan h (kh)** awal = **1**, sehingga

$$k = \frac{\omega^2}{g \cdot \tan h(kh)} = \frac{1.579}{9.81} = 0.16097$$

selanjutnya harga k diiterasi sebagai berikut:

No.	k (asumsi)	kh	tan h(kh)	k (perhitungan)
1	0.16097	51.51109	1.00000	0.1609721
2	0.16097	51.51109	1.00000	0.1609721
3	0.16097	51.51109	1.00000	0.1609721
4	0.16097	51.51109	1.00000	0.1609721
5	0.16097	51.51109	1.00000	0.1609721
6	0.16097	51.51109	1.00000	0.1609721
7	0.16097	51.51109	1.00000	0.1609721

Dari perhitungan di atas, diperoleh:

$$\begin{aligned} \tan h(kh) &= 1.00000 \\ k &= 0.16097 \end{aligned}$$

II. Menghitung Panjang Gelombang

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{gT^2 \tanh(kh)}{2\pi} \\ &= \frac{245.250}{6.283} \\ &= 39.033 \text{ m} \end{aligned}$$

Wave Number:

$$\begin{aligned} k &= \frac{2\pi}{\lambda} \\ &= \frac{6.283}{39.033} \\ &= 0.16097 \end{aligned}$$

-->

nilainya sama dengan di atas

Perhitungan Beban Angin

Kecepatan Angin (V)	=	21	m/s	
Massa Jenis udara	=	1.226	kg/m ³	
Rotor Speed (f)	=	12.1	rpm	
Angular Velocity (ω)	=	$2 \cdot \pi \cdot f$	rad/s	
	=	1.267109037	rad/s	
Power (P)	=	5	MW	
	=	5000000	W	
Titik Tangkap Gaya Angin pada Turbin (L_{trust})	=	87.6	m	diatas MWL
		164.36	m	dari COG

Beban Angin pada Turbin

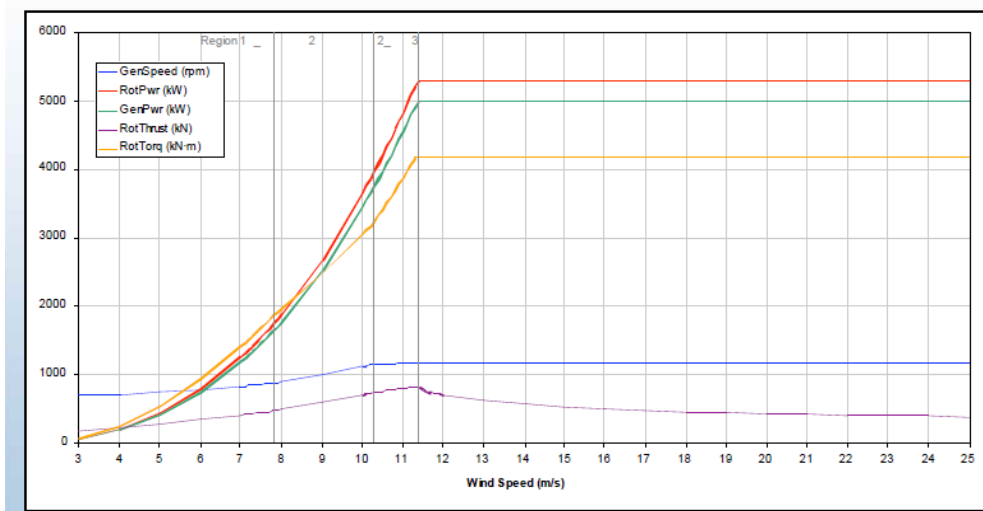
Gaya pada turbine diestimasi dari kurva yang dianalisa dengan program FAST, terlihat pada gambar dibawah.

$$\text{Gaya Pada Blade} \quad (F_{Thrust}) = 409,522 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} \text{Momen Trust} \quad (M_{Trust}) &= F_{Trust} \cdot L_{Trust} \quad (\text{Arah Pitch}) \\ &= 67,308,098.37 \text{ N.m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Momen Torsi Blade} \quad (M_{Torque}) &= \frac{P}{(\omega)} \\ &= 3,945,990.32 \text{ N.m} \quad (\text{Arah Roll}) \end{aligned}$$

Gaya *Trust* akibat gaya angin berkontribusi terhadap momen arah *pitch* dan Momen Torsi pada turbine berkontribusi terhadap momen arah *roll*



Grafik karakteristik Operasional Turbine Angin : Jonkman J, 2009

Perpindahan Akibat Beban Angin

Arah Pitch

$$\eta_1 = \frac{M_{\text{wind}}}{k_{55}} = \frac{67,308,098.37}{1,187,054,831} = 0.06 \text{ deg}$$

Perpindahan Akibat Beban Gelombang

$$\text{RAO max} = 0.848 \text{ deg/m}$$

$$k = 0.161$$

$$H_s = 2.351 \text{ m}$$

$$\eta_2 = \text{RAO max} \cdot K \cdot 1/2 H_s \text{ deg} \quad \text{perpindahan akibat gelombang}$$

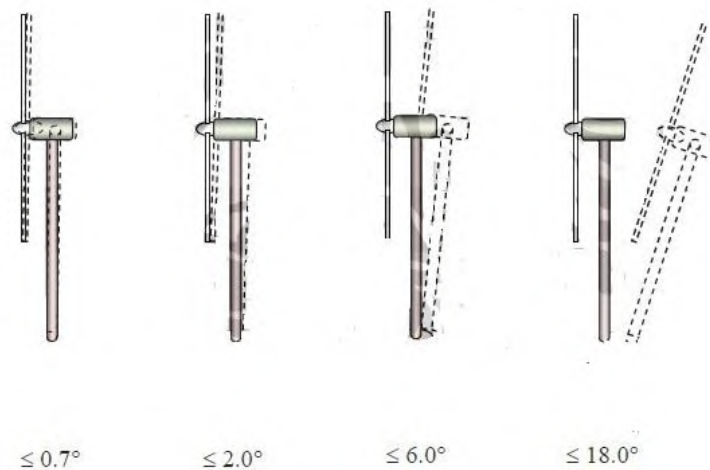
$$0.161 \text{ deg}$$

Perpindahan Total arah Pitch

$$\eta_{\text{Total}} = \eta_1 + \eta_2$$

$$= 0.22 \text{ deg} \quad \text{Operating}$$

Merujuk pada gambar dibawah, karena perpindahan total $0.02^\circ \leq 0.7$ maka tergolong dalam kategori *operating*



Menurut Rich Mercier (2004), kategori stabilitas FWT adalah sebagai berikut

Operating	$\eta \leq$	0.7 deg
Survival		2.0 deg
Stand By		6.0 deg
Damaged		18.0 deg

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisa yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa :

1. Pengaruh Sistem Tambat *Taut* sangat signifikan mereduksi gerakan struktur pada semua *mode* yang ditinjau. Pada semua *mode* gerakan Sistem Tambat *Taut* mampu mereduksi gerakan struktur rata-rata 73.86% sedangkan Sistem Tambat *Catenary* mampu mereduksi gerakan struktur rata-rata sebesar 22.30 %. Amplitudo gerakan untuk semua *mode* gerakan yang ditinjau akan tereduksi seiring dengan penambahan tinggi sarat air.
2. Konfigurasi model struktur FWT Sarat 130 M dengan Sistem Tambat *Taut* mengurangi amplitudo gerakan struktur lebih baik dibanding konfigurasi lainnya.

5.2 Saran

Adapun saran dari penulis untuk penelitian berikutnya adalah :

1. Untuk penelitian selanjutnya, perlu dilakukan analisa lebih lanjut untuk data lingkungan yang berbeda, terutama variasi perubahan kedalaman laut dan kondisi *sea state*.
2. Perlu dilakukan analisa lebih lanjut terhadap tegangan pada tali tambat dan mempertimbangkan jenis tali tambat.
3. Analisa lebih lanjut perlu mempertimbangkan bentuk geometri *floating struktur* sebagai struktur pendukung FWT baik berupa *Semi submersible*, *Tention Leg Platform* ataupun *Barge*.

DAFTAR PUSTAKA

- Akhbar, B. , 2015, “ Studi Komparasi Gerak Spar Dengan Variasi Jumlah Heave Plate dan Sistem Tambat “,**Jurnal Tugas Akhir Teknik Kelautan FTK ITS**, Surabaya : FTK ITS
- Anastasia, 2009, “ Analisa Numeris Sistem Tambat Spar Antara Catenary Mooring dan Taut Mooring System Akibat Beban Gelombang”.,**Jurnal Tugas Akhir Teknik Kelautan FTK ITS**, Surabaya : FTK ITS
- API RP 2T, 1987, “**Recomende Practice for Planning, Designing, and Construction Tention Leg Platforms**”, American Petroleum Institute.
- Chakrabakti, S.K., 1986, “**Hydrodynamic Of Offshore Structure**”, Computational Mechanics Publ, Berlin.
- Dinaryo, M., 2016, “Studi Operabilitas Spar Platform Tipe Truss di Selat Makasar dengan Sistem Tambat Taut “,**Jurnal Tugas Akhir Teknik Kelautan FTK ITS**, Surabaya : FTK ITS
- Djarmiko E.B. , 2012, “ **Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di atas Gelombang Acak** ”, Surabaya : ITS Press
- DnV, 2002,”**Guidelines for Design of Wind Turbines**”, Det Norske Veritas
- DnV RP F205, 2010, “**Global Performance Analysis of Deepwater Floating Structure**”, Det Norske Veritas
- Hendi, 2011, “ Analisa Stabilitas Turbine Angin Terapung Lepas Pantai Tipe Sistem Tention Leg Platform”.,**Jurnal Tesis Teknik Sipil FT-UI** , Depok : FT UI
- Indiyono, P. , 2003, **Hidrodinamika Bangunan Lepas Pantai**”, Surabaya : SIC

- Jonkman, J. , Buterfield, F. , Musial, W. dan Scott, G. , 2009, "Defenition of 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Defelopment", **National Renewable Energy Laboratory**, Colorado
- Jeon, S.H., Cho,Y.U. , Seo M.W. , Cho, J.R. dan Jeong, W.B. , 2013, "Dynamic Response Of Floating Substructure Of Spar-Type Offshore Wind Turbine With Catenary Mooring Cables", **Journal Ocean Engineering at ScienceDirect**, Busan
- Karimirad, M. , Gao, Z. , dan Moan, T. , 2009, " Dynamic Motion Analysis of Catenary Moored Spar Wind Turbine in Extreme Environmental Condition ", **European Offshore Wind Conference**, Sweden
- Karimirad, 2011, " Stochastic Dynamic Response Analysis of Spar-Type Wind Turbines with Catenary or Taut Mooring Systems ", **Thesis for the Degree of Philosophiae Doctor**, Trondheim : NTNU
- Lee. S, 2005, " **Dynamic Response Analysis of Spar Buoy Floating Wind Turbine Systems** ", B.S. Mechanical Engineering, Illionis : Illinois Institute of Technology
- Rofi'uddin, 2009, "Analisa Perilaku Dinamis Struktur Floating Wind Turbine (FWT) Dengan Kondisi Lingkungan di Perairan Kepulauan Seribu", **Jurnal Tugas Akhir Teknik Kelautan FTK ITS**, Surabaya : FTK ITS
- Soedjono, J. J. , 1998, "**Diktat Mata Kuliah Kontruksi Bangunan Laut II** ", Surabaya : Jurusan Teknik Kelautan – ITS.
- Sutomo, J. , 1999, "**Handout Hidrodinamika II**", Surabaya : FTK – ITS.
- Solberg, T. , 2011. " Dynamic Response Analysis of a Spar Type Floating Wind Turbine", **Master's Thesis NTNU**, Trondheim : NTNU

BIODATA PENULIS



Almutahir, lahir di Raha, Sulawesi Tenggara 13 Juli 1993. Anak ke dua dari tiga bersaudara. Setelah menamatkan pendidikan SD Negeri 1 Kondongia tahun 2006, kemudian melanjutkan pendidikan ke SMP Negeri 4 Raha dan penulis menamatkan pendidikan SMA Negeri 1 Lohia pada tahun 2012. Selanjutnya penulis diterima menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Kelautan FTK-ITS melalui program Seleksi Nasional Masuk Perguruan

Tinggi Negeri. Bidang keahlian penulis di Jurusan Teknik Kelautan adalah Bidang Hidrodinamika, Olah Gerak Bangunan Apung.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di organisasi intra dan ekstra kampus. Di awal kuliah, penulis aktif di Unit Kegiatan Mahasiswa Cinematography of ITS, Staff Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa HIMATEKLA, dan tercatat sebagai anggota Dewan Perwakilan Mahasiswa ITS. Di ekstra kampus, penulis, aktif di organisasi Himpunan Mahasiswa Islam. Selain itu penulis juga aktif di forum-forum komunikasi ilmiah. Aktivis HMI ini sangat menggemari bermain sepak bola dan renang.

e-mail : almutahir13@gmail.com